

ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

МАЛАХОВА ДІАНА ОЛЕГІВНА

УДК. 004.514

ДИСЕРТАЦІЯ

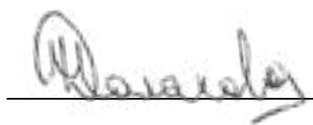
**МОДЕЛІ ТА МЕТОДИ КОМП'ЮТЕРНОЇ ПІДТРИМКИ РІШЕНЬ В
ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ ПІДГОТОВКИ ВАНТАЖНИХ ОПЕРАЦІЙ
НА ТАНКЕРАХ**

Спеціальність: 122 – «Комп'ютерні науки»

Галузь знань: 12 – «Інформаційні технології»

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дісертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

 Д. О. Малахова

Науковий керівник: **Савельєва Оксана Степанівна**, доктор технічних наук,
професор

Одеса – 2020

АНОТАЦІЯ

Малахова Д. О. Моделі та методи комп'ютерної підтримки рішень в інформаційних системах підготовки вантажних операцій на танкерах. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 122 – Комп'ютерні науки. – Одеський національний політехнічний університет, МОН України, Одеса, 2020.

У **вступі** обґрунтовано актуальність комп'ютерної підтримки рішень в інформаційних системах підготовки операцій на танкерах шляхом створення та впровадження моделей та методів обчислення та візуалізації аеродинамічних поточних даних при інертизації вантажних трюмів танкерів з метою скорочення часу процесу підготовки вантажних операцій.

У **першому розділі** дисертаційної роботи проаналізовано існуючі системи підготовки вантажних операцій і особливості прийняття рішень при інертизації вантажних трюмів.

Проведений аналіз особливостей процесу інертизації вантажних трюмів та існуючого інформаційного забезпечення. Сформульовано висновок, що всі відомі інформаційні системи, які використовуються для підготовки вантажних операцій на танкерах не задовольняють вимогам щодо контролю за якістю поточних технологічних параметрів. Такий недолік призводить до невиправдано високих значень часу отримання інформації щодо безпечної концентрації кисню на основі аналізу аеродинамічних поточних даних (АПД) всередині трюму, що призводить, як наслідок, до невиправданого високого часу простоїв танкерів. Тобто проблема створення комп'ютерної підтримки рішень в інформаційних системах підготовки вантажних операцій на танкерах є дуже актуальною для дуже широкого спектру технічних процесів і технологічних об'єктів.

Проаналізовано існуюче інформаційне забезпечення підтримки рішень та його основні складові – методи моделювання та візуалізації стану АПД

всередині трюму довільної конфігурації при його інертизації. Показано, що існуючі методи моделювання та візуалізації АПД не в повній мірі забезпечують вимоги щодо релевантності інформації в суднових системах інертизації вантажних трюмів, що призводить до високих часових витрат на здійснення процесу інертизації вантажних трюмів.

Доведено, що вирішення важливої науково-практичної задачі скорочення часових витрат на здійснення процесу інертизації вантажних трюмів танкерів може бути досягнуто шляхом розробки моделей та методів комп'ютерної підтримки рішень на основі моделювання та візуалізації АПД при інертизації.

У **другому розділі** розроблені моделі кількісного та якісного аналізу АПД при інертизації вантажних трюмів.

Оскільки одержання релевантної інформації можливо тільки на основі кількісного та якісного аналізу АПД в трюмі вантажного танкеру, то проведено аналіз математичних моделей руху крапельних і газоподібних рідин. Запропоновано провести класифікацію існуючих моделей АПД для отримання інтегральних та локальних характеристик процесу інертизації трюмів танкерів за рівнями обчислювальної складності відповідних рівнянь, які дозволяють моделювати АПД в просторово обмежених умовах трюмів.

Запропонована класифікація будується з урахуванням критеріїв стійкості розрахунку та ресурсів комп'ютерних засобів, які необхідно використовувати для отримання інформації для прийняття рішень (вимог до процесору, об'єму оперативної пам'яті, часу та якості моделювання, тощо).

Показано, що рівень обчислювальної складності відповідних моделей залежить від кількості доданків, що входять до складу диференціальних рівнянь та безпосередньо впливають на якість відтворення фізичних особливостей переміщення та стану АПД, а також від ступеня урахування значення в'язкості в локально виділеній і/або всієї області течії та градієнтів змін всіх кінематичних характеристик АПД в часі.

Запропоновано проводити класифікацію математичних гідродинамічних моделей за чотирма рівнями складності:

Перший (простий) рівень – використовує диференціальні рівняння, що не відтворюють в'язкісні ефекти. Моделі цього рівня потребують невеликого часу розрахунку але дають змогу будувати образи візуалізації АПД тільки на початковому рівні, що не забезпечує релевантну інформацію для комп'ютерної підтримки особи, що приймає рішення (ОПР).

Другий (незначно складний) рівень – відповідає спільному використанню двох видів моделей руху потоку рідини або газу. Перша модель обчислює прикордонний шар в тонкій області потоку, що межує з твердими поверхнями. Друга модель обчислює потенційну течію в якій вся рідина або газ вважаються ідеальними. Їх сумісне використання потребує збільшення в два–три рази розрахункового часу та дозволяє отримувати кількісні характеристики АПД та на їх підставі візуалізовувати лінії току та поля течії у вигляді ізоліній (ізобар, ізохор, ізотерм і т.п.). Цей факт підвищує релевантність інформації для комп'ютерної підтримки ОПР.

Третій (середньо складний) рівень – моделі використовують стаціонарні багатовимірні рівняння руху потоку, що за час свого руху став повністю усталеним. На цьому рівні запропоновано використовувати стаціонарні рівняння Нав'є–Стокса. Моделі такого рівня обчислюють реальні течії, де рух потоку визначається ефектами в'язкості. Використання таких моделей потребує великих затрат розрахункового часу, але дозволяє отримувати всі кількісні характеристики АПД і на їх підставі повністю візуалізовувати всі специфічні особливості робочого процесу інертизації і надавати найбільш релевантну інформацію для ОПР, що забезпечує якісну підтримку рішення.

Четвертий (високо складний) рівень – передбачає спільне використання нестационарних багатовимірних рівнянь руху Нав'є–Стокса або нестационарних багатовимірних рівнянь руху Рейнольдса. Такі рівняння завжди доповнюють моделями турбулентності у вигляді додаткових систем диференціальних рівнянь з емпіричними коефіцієнтами, що дозволяє отримувати всі без винятку характеристики АПД та використовувати їх для розробки або під час наукових

досліджень нового обладнання. Цей рівень є найбільш ресурсозатратним і потребує використання потужних серверів для моделювання.

Таким чином, отримано *перший пункт наукової новизни*, а саме: вперше розроблено багаторівневу класифікацію моделей за рівнями обчислювальної складності систем диференціальних гідродинамічних рівнянь для моделювання аеродинамічних поточкових даних в обмежених умовах, що дозволило проводити кількісний та якісний аналіз процесу інертизації трюмів танкеру з різними часовими витратами та різними рівнями якості прийняття рішення ОПР.

З урахуванням запропонованої класифікації було удосконалено модель обчислення АПД. Ця модель на відміну від існуючих основана на розробленій багаторівневій класифікації моделей руху потоку рідини або газу на основі гідродинамічних рівнянь для визначення концентрації інертних газів в трюмі під час інертизації. Це дозволило отримати інтегральні та локальні характеристики процесу інертизації трюмів танкеру для кількісного і якісного аналізу АПД.

Запропоновану чотиривимірну модель обчислення АПД при інертизації трюмів (рис. 1) з загальною структурою масивів виду:

$$V_{i,j,k} \sim V[i=0..N, j=0..M, k=0..F, t=1..3],$$

де N , M , F – розмірність просторової сітки, яка визначається кількістю розрахункових вузлів в напрямку X (номер останнього вузла дорівнює N), Y (номер останнього вузла дорівнює M), Z (номер останнього вузла дорівнює F); t – тимчасовий рівень (максимальне значення $t = 3$).

Модель передбачає трьохвимірне відтворення розрахункових АПД в часі (четвертому вимірюванню) з подальшим представленням у вигляді одновимірних масивів. Модель також передбачає запропановану траєкторію обчислень одновимірних масивів з подальшою переадресацією, що дозволяє враховувати результати попередніх кроків обчислень та тим самим знижує час обчислень при незначному збільшенні ресурсів оперативної пам'яті комп'ютера.

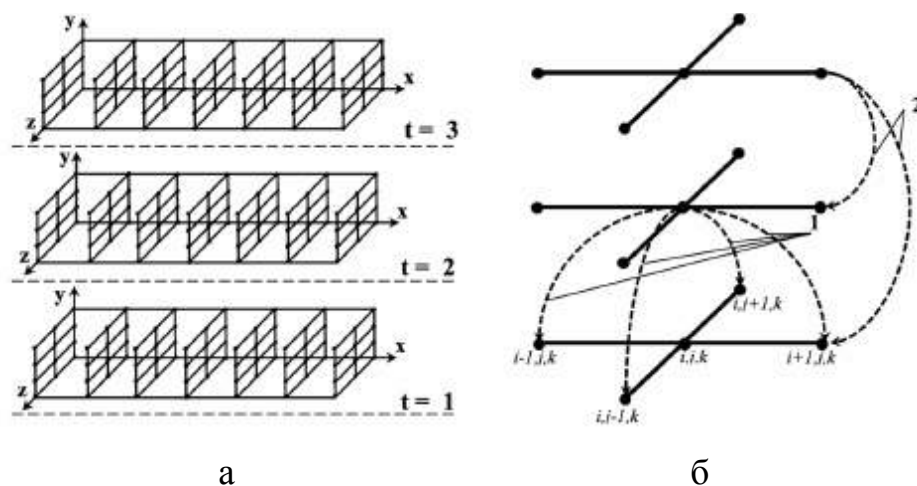


Рисунок 1 – Чотирьохвимірний модель обчислення АПД при інертизації трюмів (а – представлення АПД в чотирьохвимірному просторі; б – траєкторія обчислення одновимірних масивів).

При програмній реалізації запропонованої моделі АПД необхідно постійно здійснювати перевірку якості одержуваних результатів. Це можна робити з дотриманням двох умов.

Перша умова – в кожному розрахунковому вузлі, який відповідає дискретній області модельованої течії, повинна витримуватися умова стійкості обчислювального процесу. Критерієм такої стійкості є значення сіткового числа Рейнольдса менше одиниці.

Другою умовою є перевірка невідповідності знаку рівності в основних рівняннях руху. Така перевірка повинна здійснюватися в кожному розрахунковому вузлі і на кожному часовому рівні. Якщо максимальна величина розрахункового дисбалансу знаходиться на рівні менше $1 \cdot 10^{-6}$ то можна вважати, що модельований потік відтворюється з максимальним наближенням до реальної течії.

Таким чином отримано *другий пункти наукової* новизни, а саме: удосконалено модель обчислення аеродинамічних потокових даних за рахунок їх чотирьохвимірного відтворення з подальшим представленням у вигляді одновимірних масивів та їх подальшого обчислення з урахуванням результатів попередніх розрахункових рівнів, що дозволяє знижувати час обчислень АПД

при незначному збільшенні ресурсів оперативної пам'яті комп'ютера.

У **третьому розділі** дисертаційної роботи розроблено методи обчислення АПД та підтримки рішення ОПР в інформаційних системах підготовки вантажних операцій на танкерах.

При практичному використанні розробленої чотирьохвимірної моделі обчислення АПД встановлено, що проведення такого моделювання потребує значних затрат ресурсів оперативної пам'яті та процесора комп'ютера. З метою скорочення цих ресурсів розроблено метод моделювання процесу інертизації вантажних трюмів танкера з використанням методу розщеплення на підставі принципу Гюйгенса–Адамара.

Метод передбачає виконання наступних кроків:

- множина всіх точок, що відображають елементи масивів кінцевих даних процесу піддається сегментації. В цьому випадку область трюму поділялася на три частини: гранична область (простір, що прилягає до стінок трюму) поблизу вертикальних стінок трюму і його дна; внутрішня область (весь внутрішній простір трюму); верхня область (простір, що прилягає до верхньої стінці трюму з областю виходу повітря в навколишній простір);

- відбувається розщеплення розрахункового простору з визначенням всіх необхідних параметрів АПД з подальшою кластеризацією результатів. Перехід від кластера до кластеру проводиться за рахунок використання операції усереднення оброблюваного параметра на даному часовому рівні або в конкретно взятому розщепленому перетині;

- характеристики АПД візуалізуються в якості локального або інтегрального параметра, що відображає просторовий характер розподілу.

- для нового часового рівня отримують новий масив поточкових даних.

Використання таких кроків моделювання на підставі чотирьохвимірної моделі обчислення АПД дозволяє отримувати вірогідні остаточні результати при зменшенні часу розрахунку до 30 % в порівнянні з обчисленням АПД за стандартними алгоритмами.

Таким чином, отримано *третій пункт наукової новизни*, а саме отримав подальший розвиток метод обчислення потокових даних на основі запропонованої їх чотирьохвимірної моделі, який полягає в розщепленні багатовимірного процесу на послідовність одновимірних, на підставі узагальненого принципу Гюйгенса–Адамара, що дозволило значно скоротити час моделювання процесу інертизації судна та забезпечити візуалізацію релевантної інформації для прийняття рішень щодо підготовки вантажних операцій на танкерах.

Сукупність розроблених багаторівневої класифікації гідродинамічних рівнянь, чотирьовимірної моделі відтворення АПД та методу їх розщеплення за принципом Гюйгенса–Адамара при моделюванні дозволило розробити метод підтримки прийняття рішень при інертизації вантажних трюмів танкерів (рис. 2).

Метод передбачає виконання наступних кроків:

- формулювання завдань процесу інертизації;
- визначення рівня складності моделі відтворення АПД згідно з запропонованою багаторівневою класифікацією;
- завдання початкових і граничних умов для моделювання відтворення АПД;
- проведення моделювання для обчислення АПД та при необхідності збереження результатів моделювання в СУБД;
- одержання даних від засобів вимірювання;
- порівняння інформації, яка одержана шляхом моделювання та вимірювання;
- прийняття рішення щодо процесу інертизації.

Під час реалізації методу підтримки прийняття рішень при інертизації вантажних трюмів танкерів основними джерелами отримання інформації в комплексі є дані від судових засобів вимірювання, дані зі сховища основних модулів процесу моніторингу та моделювання попередніх аналогічних технологічних процесів із СУБД, дані з сформованих користувачем масивів

вихідних величин, які необхідно використовувати в інформаційній технології для комп'ютерної підтримки рішень (ІТ КІР) при моніторингу технологічних процесів в трюмах танкера. Також передбачається використання стандартних бібліотек і баз даних, побудованих на принципі модульної системи.



Рисунок 2 Схема реалізації методу підтримки прийняття рішень при інертизації вантажних трюмів танкерів

У момент формування початкових АПД ІТ КІР одночасно з початком реального процесу інертизації трюмів здійснює процесінг візуалізованої інформації. Цей процес є ітераційним. При необхідності в будь-який момент часу він передбачає проведення коригування процесу моделювання з боку користувача.

В якості інформації для прийняття рішень можуть бути використані як результати моделювання процесу, так і результати вимірювання засобів вимірювання за рахунок передачі по HART протоколу. У загальному випадку ІТ КІР враховує наступні характеристики технологічного процесу: поточне значення концентрації кисню всередині трюму; поточне значення температури усередині трюму, гідростатичний тиск всередині трюму.

Таким чином отримано **четвертий пункти наукової новизни**, а саме вперше запропонований метод підтримки прийняття рішень при інертизації вантажних трюмів танкерів, який базується на використанні розробленої класифікації рівнів обчислювальної складності, удосконаленої моделі обчислення аеродинамічних потокових даних та методі їх обчислення, що дозволяє розробити інформаційну технологію для комп'ютерної підтримки рішень та дає можливість значно скоротити технологічний час процесу інертизації.

Четвертий розділ присвячений створенню ІТ КПР в інформаційних системах підготовки вантажних операцій на танкерах на основі розроблених моделей та методів. ІТ КПР дозволяє отримати відображення чотирьох індикаторів процесу: часу інертизації танкера; ступеня виконання процесу інертизації; рівня зміни концентрації кисню в трюмі при його вентиляції; поточного значення розподілу концентрації кисню всередині трюму.

Апробація ІТ КПР при здійсненні вантажних операцій на танкерах показала скорочення часових витрат на здійснення процесу інертизації вантажних трюмів танкерів в середньому на 10%.

Використання ІТ КПР для потокової інформаційної обробки поточних результатів процесу заповнення вантажного трюму танкера інертними газами дозволило встановити, що отримані під час моделювання прогнозовані чисельні значення залишкової концентрації кисню, збігаються з показниками газоаналізатора з похибкою, менш 1,7 %.

В умовах роботи судна розроблена ІТ КПР дала змогу ОПР приймати рішення щодо перебігу процесу та відсутності аварійних режимів на протязі всього технологічного процесу інертизації. Розроблена ІТ КПР може бути використана сумісно з існуючими стандартними газоаналізаторами, термометрами і датчиками тиску, що працюють на базі HART протоколу.

Ключові слова: інформаційна технологія, комп'ютерна підтримка рішень, візуалізація аеродинамічних потокових даних.

ABSTRACT

Malakhova D. O. Computer decisions support models and methods in information systems for cargo operations preparation on tankers – Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

Thesis for the degree of Doctor of Philosophy in the specialty 122 – Computer Science. – Odessa National Polytechnic University of the Ministry of Education and Science of Ukraine, Odessa, 2020.

The introduction substantiates the relevance of computer support for solutions in information systems for preparation of operations on tankers by creating and implementing models and methods for calculating and visualizing aerodynamic flow data when inertizing cargo holds of tankers to reduce the time of preparation of cargo operations.

In the first chapter of the dissertation the existing systems of preparation of cargo operations and features of decision-making at inertizing of cargo holds are analyzed.

The analysis of features of process of inertization of cargo holds and the existing informational support was carried out. It was concluded that all known information systems used for the preparation of cargo operations on tankers do not meet the requirements for quality control according to current technological parameters. This shortcoming leads to unreasonably high values of time to obtain information on safe oxygen concentration based on the analysis of aerodynamic flow data (AFD) inside the hold, which, as a consequence, leads to unreasonably high downtime of tankers. Therefore, the problem of creating computer support solutions in information systems for the preparation of cargo operations on tankers is very relevant for a very wide range of technical processes and technological objects.

Was analyzed the existing informational support of decision aid and its main components - methods of modeling and visualization of the state of the AFD within the hold of arbitrary configuration during its inertizing. The existing information support of decision support and its main components are analyzed - methods of

modeling and visualization of the state of the AFD within the hold of arbitrary configuration during its inertizing. It was shown that the existing methods of modeling and visualization of APD do not fully meet the requirements for the relevance of information in ship systems of inertizing of cargo holds, which leads to high time costs for the process of inertizing of cargo holds.

It is proved that the solution of an important scientific and practical problem of reducing the time spent on the process of inertizing of cargo holds of tankers can be achieved by developing models and methods of computer support solutions based on modeling and visualization of AFD during inertizing.

Since obtaining relevant information is possible only on the basis of quantitative and qualitative analysis of AFD in the hold of a cargo tanker, the analysis of mathematical models of the movement of droplets and gaseous liquids was performed. It was proposed to classify the existing AFD models to obtain integrated and local characteristics of the process of inertizing of tanker holds by the levels of computational complexity of the respective equations, which allow modeling of AFD in spatially limited holds conditions.

The proposed classification is based on the criteria of stability of the calculation and the resources of computer tools that must be used to obtain information for decision-making (requirements for the processor, RAM, time and quality of modeling, etc.).

It is shown that the level of computational complexity of the respective models depends on the number of terms that are part of the differential equations and directly affect the quality of reproduction of physical features and state of the AFD, as well as the degree of viscosity in the locally selected and / or entire flow region and gradients of changes of all kinematic characteristics of AFD in time.

It was proposed to classify mathematical hydrodynamic models according to four levels of complexity:

The first (simple) level - uses differential equations that do not reproduce the viscosity effects. Models at this level require little computational time, but allow you

to build AFD visualization images only at the initial level, which does not provide relevant information for computer support of the decision maker (DM).

The second (slightly complex) level - corresponds to the joint use of two types of models of liquid or gas flow. The first model calculates the boundary layer in a thin flow region adjacent to hard surfaces. The second model calculates the potential flow in which all liquid or gas is considered ideal. Their joint use requires doubled or tripled computational time and allows obtaining quantitative characteristics of the AFD and on their basis to visualize current lines and flow fields in the form of isolines (isobar, isochor, isotherm, etc.).

The third (medium) level - the models use stationary multidimensional equations of flow, which during its movement has become completely stable. At this level, it is proposed to use stationary Navier – Stokes equations. Models of this level calculate real flows, where the flow is determined by the effects of viscosity. The use of such models requires a large amount of computational time, but allows obtaining all the quantitative characteristics of the AFD and on their basis to fully visualize all the specific features of the inertizing workflow and provide the most relevant information for DM, providing quality solution support.

The fourth (highly complex) level involves the joint use of nonstationary multidimensional equations of Navier – Stokes motion or nonstationary multidimensional equations of Reynolds motion. Such equations are always supplemented by turbulence models in the form of additional systems of differential equations with empirical coefficients, which allows to obtain all without exception the characteristics of the AFD and use them for the development or research of new equipment. This level is the most resource-intensive and requires the use of powerful servers for modeling.

Thus, the first point of scientific novelty was obtained, specifically: a multilevel classification of models by levels of the computational complexity of differential hydrodynamic equations for modeling aerodynamic flow data in limited conditions was developed for the first time, which allowed conducting a quantitative

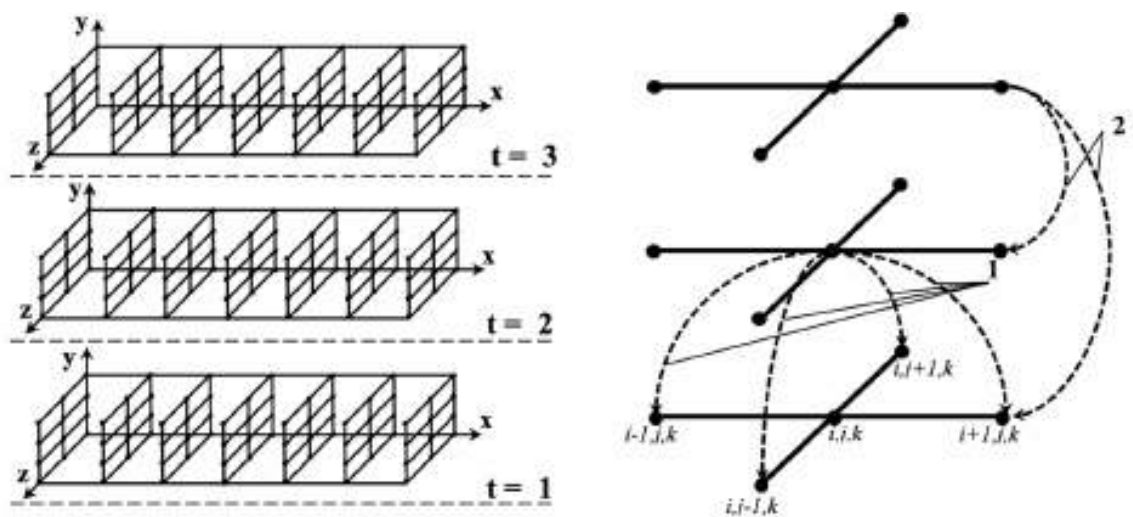
and qualitative analysis of tanker inertizing process with different time costs and different levels of quality of decision making.

Taking into account the proposed classification, the model of calculating AFD was improved. In contrast to the existing ones, this model is based on the developed multilevel classification of liquid or gas flow models based on hydrodynamic equations to determine the concentration of inert gases in the hold during inertizing. This allowed to obtain integrated and local characteristics of the process of inertizing of tanker holds for quantitative and qualitative analysis of AFD.

The four-dimensional model of calculation of APD at inertizing of holds is offered (pic. 1) with the general following structure of arrays:

$$V_{i,j,k} \sim V[i=0..N, j=0..M, k=0..F, t=1..3],$$

where N, M, F - the dimension of the spatial grid, which is determined by the number of calculation nodes in the direction X (the number of the last node is N), Y (the number of the last node is M), Z (the number of the last node is F); t - time level (maximum value of $t = 3$).



Picture 1 - Four-dimensional model for calculating AFD when inertizing holds (a - representation of AFD in four-dimensional space; b - trajectory for calculating one-dimensional arrays).

The model provides three-dimensional reproduction of AFDs calculated in time (the fourth dimension) with the subsequent representation in the form of one-

dimensional arrays. The model also provides the proposed trajectory of computing one-dimensional arrays with subsequent redirection, which allows you to take into account the results of previous computational steps and thus reduces computational time with a slight increase in computer RAM.

During software implementation of the proposed model of AFD it is necessary to constantly check the quality of the results. This can be done under two conditions.

The first condition - each calculation node that corresponds to a discrete area of the simulated flow must meet the condition of stability of the computational process. The criterion for such stability is the value of the grid number of Reynolds less than one.

The second condition is to check the inconsistency of the equal sign in the basic equations of motion. Such verification shall be performed at each settlement node and at each time level. If the maximum value of the calculated imbalance is less than $1 \cdot 10^{-6}$, then we can assume that the simulated flow is reproduced with the maximum proximity to the real flow.

Thus the second point of scientific novelty is obtained, specifically: improvement of calculation model of aerodynamic flow data due to their four-dimensional reproduction with the subsequent representation in the form of one-dimensional arrays and their further calculation taking into account results of the previous settlement levels that allow reducing AFDs computation time with only a slight increase in computer RAM.

In the third chapter of the dissertation are developed the methods of AFD calculation and support of the decision-makers in information systems of preparation of cargo operations on tankers.

In practical use of the developed four-dimensional model of AFD calculation, it was established that carrying out such modeling demands considerable expenses of resources of RAM and the computer processor. In order to reduce these resources, was developed a method for modeling the process of inertizing of cargo holds of a tanker using the method of splitting based on the Huygens-Hadamard principle.

The method involves the following steps:

- the multitude of all points that reflect the elements of the arrays of the final data of the process is segmented. In this case, the hold area was divided into three parts: the boundary area (the space adjacent to the hold walls) near the vertical walls of the hold and its bottom; inner area (the entire inner space of the hold); the upper area (the space adjacent to the upper wall of the hold with the area of air outlet into the surrounding space);

- the calculated space is being split with the determination of all the necessary AFD parameters with subsequent clustering of the results. The transition from cluster to the cluster is performed by using the operation of averaging the processed parameter at a given time level or in a specific split section;

- AFD characteristics are visualized as a local or integral parameter that reflects the spatial nature of the distribution;

- for a new time level a new array of streaming data is being collected.

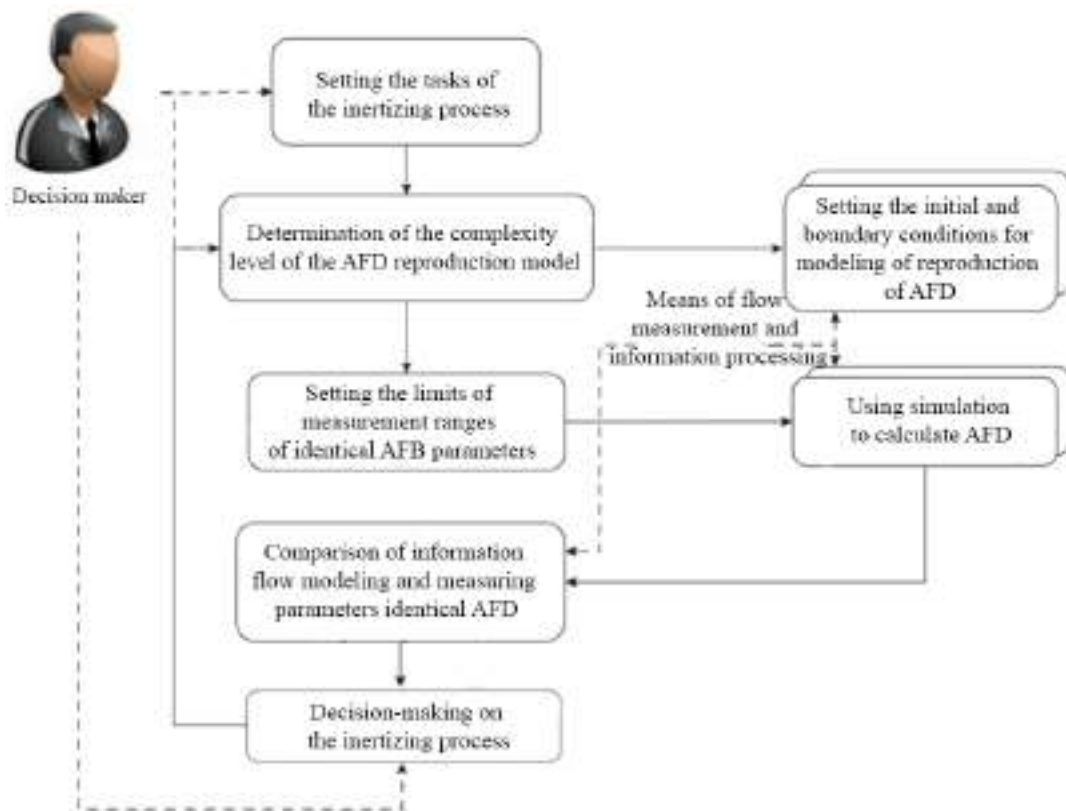
The use of such modeling steps based on a four-dimensional AFD calculation model allows obtaining probable final results while reducing the calculation time to up to 30% compared to the AFD calculation by standard algorithms.

Thus, the third point of scientific novelty was obtained, specifically: the development of a method of calculating flow data based on their proposed four-dimensional model, which consists in splitting a multidimensional process into a sequence of one-dimensional ones, based on the generalized Huygens-Hadamard principle, which significantly reduced modeling time of inertizing process of the vessel and provides visualization of relevant information for decision-making when preparing cargo operations on tankers.

The set of developed multilevel classification of hydrodynamic equations, four-dimensional AFD reproduction model, and the method of their splitting according to the Huygens-Hadamard principle in modeling allowed the development of a method of decision-making support in inertizing of cargo holds of tankers (Pic. 2).

The method involves the following steps:

- setting the tasks of the inertizing process;



Picture 2. Scheme of implementation of decision support method when inertizing the cargo holds of tankers

- determination of the complexity level of the AFD reproduction model according to the proposed multilevel classification;
- setting the initial and boundary conditions for modeling of reproduction of AFD;
- modeling to calculate the AFD and, if necessary, save the simulation results in the database;
- obtaining data from measuring instruments;
- comparison of information obtained by modeling and measurement;
- decision-making on the inertizing process.

During the implementation of the method of decision support in the inertizing of cargo holds of tankers, the main sources of information in the complex are data from ship measuring instruments, data from the repository of basic modules of the monitoring and modeling of previous similar processes from database, data from

user-generated arrays that have to be used in information technology for computer decision support (IT CDS) at technological processes monitoring in tanker holds. The use of standard libraries and databases based on the modular system is also envisaged.

At the time of the initial AFD formation, IT CDS simultaneously with the beginning of the real holds inertizing process carries out the processing of visualized information. This process is iterative. If necessary, at any time, it enables adjusting the modeling process by the user.

As information for decision-making can be used both the results of process modeling and the results of measurement of measuring instruments transmitted through the HART protocol. In the general case, IT CDS takes into account the following characteristics of the technological process: the current value of the oxygen concentration inside the hold; the current value of the temperature inside the hold, the hydrostatic pressure inside the hold.

Therefore, the fourth point of scientific novelty is obtained, specifically: firstly proposed method of decision support for cargo holds of tankers inertizing, which is based on the use of the developed classification of computational complexity, improved model for calculating aerodynamic flow data and the method of computing, which allows developing information technology of computer decision-support and makes it possible to significantly reduce the technological time of the inertizing process.

The fourth chapter is devoted to the creation of IT CDS in information systems for cargo operations preparation on tankers based on developed models and methods. IT CDS allows displaying four process indicators: tanker inertizing time; the stage of inertizing process implementation; the level of change in the concentration of oxygen in the hold during ventilation; the current value of oxygen concentration distribution inside the hold.

Approbation of IT CDS during cargo operations on tankers showed a reduction in time spent on inertizing process of tankers cargo holds by an average of 10%.

The use of IT CDS for processing current results of the process of filling the cargo hold of the tanker with inert gases helped to establish that the predicted numerical values of the residual oxygen concentration obtained during the simulation coincide with the gas analyzer with an error of less than 1.7%.

During the vessel's operation, the developed IT CDS allowed a decision-maker to make decisions on the course of the process and the absence of emergency modes throughout the technological process of inertizing. The developed IT CDS can be used in conjunction with existing standard gas analyzers, thermometers, and pressure sensors that work on the basis of the HART protocol.

Keywords: information technology, computer decision support, aerodynamic flow data visualization.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

Результати дисертації викладені у 13 наукових публікаціях, серед них 5 - у фахових збірниках, з яких 2 статті опубліковані без співавторів і 1 – у періодичних наукових виданнях інших держав, а також 8 тез та доповідей апробаційного характеру на міжнародних конференціях.

1. Malakhov O., Kolegaev M., Malakhova D., Maslov I., Brazhnik I., Gudilko R. Improvement of working parameters of ships with the use of water-fuel emulsions. Technology audit and production reserves. Vol 6, N 3(44), 2018. Pp. 14-20. *Видання входить до міжнародних наукометричних баз Index Copernicus Journals Master List, 1findr, EBSCO, OpenAIRE, Ulrich's Periodicals Directory, BASE, DOAJ, WorldCat, CrossRef, WorldWideScience.org, SAJI, CNKI Scholar, Microsoft Academic Search, Zeitschriftendatenbank (ZDB), EconBiz, MIAR (Information Matrix for the Analysis of Journals), Scilit, EconPapers, IDEAS. ERIH PLUS (The European Reference Index for the Humanities and the Social Sciences), Dimensions, FSTA, JournalTOCs, ResearchBib, ROAD, DRJI, Genamics JournalSeek, PBN, SHERPA RoMEO, CORE (COncnecting REpositories), Neliti, Lens, Paperity, Root Society, Wizdom.ai.*

2. Малахова Д.О. Інформаційні технології для контролю процесу вентиляції вантажних трюмів танкеру. Вчені записки Таврійського національного університету ім. В.І. Вернадського. Серія – Технічні науки. Т. 30 (69). № 5, 2019. С. 122-126. *Видання входить до міжнародної наукометричної бази Index Copernicus International.*

3. Малахова Д. О. Классификация уравнений гидродинамики для использования в информационных технологиях при визуализации течений. Науковий вісник Херсонської державної морської академії. No 2 (21), 2019. С. 121-129. *Видання входить до міжнародних наукометричних баз Наукова електронна бібліотека E-Library.Ru, Google Scholar, Researchbib, Crossref.*

4. Савельева О. С. Малахова Д. О. Застосування інформаційних технологій у суднових технологічних процесах. Суднові енергетичні установки.

Науковий-технічний збірник. № 39, 2019. С. 78-88. *Видання входить до міжнародної наукометричної бази Google Scholar.*

5. Oleksiy V. Malakhov, Mikhail O. Kolegaev, Igor D. Brazhnik, Oksana S. Saveleva, Diana O. Malakhova. New Forced Ventilation Technology for Inert Gas System on Tankers. International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE), Volume-9 Issue-4, February 2020. pp. 2549-2555. *Видання входить до міжнародних наукометричних баз Web of Science, SJCR-Q4, Lattice Science, Mendeley, Kudos, Crossref, Index Copernicus International, Google Scholar, J-Gate, WorldCat, Informatics, The Directory of Research Journal Indexing, Blue Eyes Intelligence Engineering & Sciences Publication, The Global Impact Factor, Research Gate, ROAD, Digg.*

6. Савельєва О. С., Малахова Д. О. Методологія візуалізації гідродинамічних потоків. *Матеріали V Українсько-німецької конференції «Інформатика. Культура. Техніка».* – м. Одеса, 2017. – С. 117 - 118.

7. Малахов А. В., Палагин А. Н., Гудилко Р. Г., Малахова Д. О. Изучение процесса разрушения движущихся воздушных каверн внутри заполненных балластных танков судов погружного типа SEMI-SUBMERSIBLE HEAVY-LIFT. *Матеріали науково технічної конференції «Річковий та морський флот експлуатація і ремонт».* – м. Одеса, 2017. – С. 41 - 45.

8. Савельєва О. С., Становська І. І., Гур'єв І. М., Малахова Д. О., Саух І. А. Інформаційні технології управління проектною логістикою за допомогою віртуальних моделей. *Матеріали IV Міжнародної науково-практичної конференції «Summer InfoCom Advanced Solutions».* – м. Київ, 2017. – С. 43 - 44.

9. Савельєва О. С., Малахова Д. О. Методи побудови графічних образів поля швидкості і тиску при проведенні гідродинамічних розрахунків. *Матеріали VI Українсько-німецької конференції «Інформатика. Культура. Техніка».* – м. Одеса, 2018. – С. 98-99.

10. Малахов А. В., Колегаев М. А., Бражник І. Д., Гудилко Р. Г., Малахова Д. О. Управление процессом вентиляции трюмов танкера. *Матеріали*

VIII Міжнародної науково-практичної конференції «Інформаційні управляючі системи і технології». – м. Одеса, 2019. – С. 232-234.

11. Малахов О. В., Маслов І. З., Гуділко Р. Г., Малахова Д. О. Особливості руху багатофазного газового струменя в змінному температурному полі. *Матеріали IX Міжнародна науково-практична конференція «Сучасні підходи до високоефективного використання засобів транспорту».* – м. Ізмаїл, 2018. – С. 148-152.

12. Савельєва О. В., Герганов М. Л., Малахова Д. О. Інформаційна технологія моделювання псевдовільних потоків крізь поруване середовище. *Моделювання в прикладних наукових дослідженнях.: Матеріали XXVII семінару Одеського національного політехного університету.* – м. Одеса, 2019. – 2019. – С. 15-17.

13. Савельєва О. С. Малахова Д. О., Програмний комплекс для застосування інформаційної технології на танкері. *Матеріали Науково-технічної конференції «Морський та річковий флот: експлуатація і ремонт».* – м. Одеса, 2020. С. 191-199.

ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ	2
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	25
ВСТУП	27
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ПРОЦЕСУ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ В ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ ПІДГОТОВКИ ВАНТАЖНИХ ОПЕРАЦІЙ	33
1.1. Аналіз особливостей процесу інертизації вантажних трюмів.....	33
1.2. Аналіз інформаційного забезпечення для моделювання та візуалізації аеродинамічних потокових даних.....	36
1.3. Комп'ютерна підтримка рішень під час процесу інертизації вантажних трюмів танкера.....	40
1.4. Способи відображення аеродинамічних потокових даних	44
1.5. Методи візуалізації аеродинамічних потокових даних для інформаційного забезпечення підтримки рішень при інертизації вантажних трюмів танкерів	53
1.6. Засоби графічної побудови полів розподілу параметрів при описі гідродинамічних процесів	57
1.7. Висновки по розділу 1.....	61
РОЗДІЛ 2. МОДЕЛІ КІЛЬКІСНОГО АНАЛІЗУ ТА ВІЗУАЛІЗАЦІЇ ПОТОКОВИХ ДАНИХ ПРИ ІНЕРТИЗАЦІЇ ВАНТАЖНИХ ТРЮМІВ ...	64
2.1. Багаторівнева класифікація для моделювання аеродинамічних потокових даних.....	64
2.2. Математична модель ізотермічного руху двофазного потоку з перенесенням маси	69
2.3. Дискретизація основних рівнянь математичної моделі	72
2.4. Розробка моделі обчислення аеродинамічних потокових даних	75
2.5. Висновки по розділу 2.....	78

РОЗДІЛ 3 МЕТОДИ ОБРОБКИ АЕРОДИНАМІЧНИХ ПОТОКОВИХ ДАНИХ ПРИ ІНЕРТИЗАЦІЇ ВАНТАЖНИХ ТРЮМІВ ТАНКЕРА	80
3.1. Метод розщеплення на підставі принципу Гюйгенса–Адамара	80
3.2. Метод обчислення поточкових даних на основі запропонованої їх чотирьохвимірної моделі	84
3.3. Розробка методу підтримки прийняття рішень при інертизації вантажних трюмів танкера.....	88
3.4. Висновки по розділу 3.....	90
РОЗДІЛ 4. РОЗРОБКА ТА ВПРОВАДЖЕННЯ ІНФОРМАЦІЙНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ В СУДНОВОМУ ТЕХНОЛОГІЧНОМУ ПРОЦЕСІ	92
4.1 Комп'ютерна підтримка рішень в інформаційних системах підготовки вантажних операцій на танкерах	92
4.2. Результати візуалізації аеродинамічних поточкових даних при інертизації вантажних трюмів танкера	107
4.3. Застосування запропонованих рішень при візуалізації наукових досліджень.....	120
4.4. Висновки по розділу 4.....	135
ВИСНОВКИ	137
Список використаної літератури	140
ДОДАТКИ	153
ДОДАТОК А. Акт впровадження результатів дослідження в роботу судноплавної компанії Bourbon Marine Services Greenmar	154
ДОДАТОК Б. Акт про впровадження в навчальний процес результатів дисертаційної роботи.....	157
ДОДАТОК В. Розрахунковий блок програмного комплексу для моделювання руху обмеженого потоку рідини з використанням з використанням методу розщеплення для вирішення рівнянь 4 рівня складності.....	159

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

СППР – система підтримки прийняття рішень;

АПД - аеродинамічні потокові дані;

ІТ – інформаційна технологія;

КПР – комп'ютерна підтримка рішень;

ОПР – особа, що приймає рішення;

АСППР - автоматизована система підтримки прийняття рішень;

ЕСПР - експертна система прийняття рішень;

ЕС - експертна система;

CFD (Computational Fluid Dynamics) – обчислювальна гідромеханіка;

PIV (Particle image velocimetry) – метод слідкування за частинками в потоці;

PCA (Principal Component Analysis) - метод головних компонент;

Image inpainting - метод заповнення;

MaxScript – вхідна мова пакету 3ds Max;

SAS (Scale Adaptive Simulation) – моделювання з використанням масштабною адаптації;

КВП і А – контрольно-вимірювальні прилади і апаратура;

ρ – щільність, кг/м³;

P_v – парціальний тиск сухого повітря, Па;

$P_{н.п}$ – парціальний тиск насиченої водяної пари, Па;

ψ – відносна вологість, %;

R_v – газова постійна для сухого воздуха, Дж/(кгК);

R_v – газова постійна для пара, Дж/(кгК);

T – температура, К;

z – геометричний напір, м;

$\frac{P}{\rho g}$ – п'єзометричний напір, м.в.ст;

$\frac{V^2}{2g}$ – швидкісний напір, м.в.ст;

V_i, V_j – компоненти швидкості, м/с;

x_j – поточна координата, м;

τ_{ij} – компонента тензора напружень, Па;

F_j – складова масової сили, Н;

x, y, z – просторові координати, м;

P – тиск, Па;

τ – дотичні напруження, Па;

S_v – тензор швидкостей деформації, Па;

T_{kl} – тензор квазіламінарних напруг, Па;

T_t – тензор турбулентних напруг, Па;

C_i, C_i' – концентрація повітря всередині і зовні вантажного трюму, кг/м³;

μ – динамічна в'язкість повітря, Па·с;

C_i – концентрація димових газів в об'ємі повітря, кг/м³;

D_i – коефіцієнт дифузії димових газів, м²/с;

S_i – початкова швидкість димових газів, м/с;

Q – витрата димових газів, м³/с;

χ – температурна провідність, м²/с;

ν – кінематична в'язкість, м/с²;

c_v – питома теплоємність, Дж/(кг·К);

r – радіус сфери для розрахунку температури, м;

q – інтенсивність тепловиділення, Вт;

r_0 – радіус теплового сферичного джерела на якому задана температура, м;

T_{atm} – Температура навколишнього середовища, °С;

Δt – розрахунковий часовий крок, с;

ВСТУП

Актуальність теми. На теперішній час в усьому світі і зокрема в Україні зростає попит на перевезення водним транспортом. Вантажовласники в умовах економічної нестабільності, зростання цін на пальне, збільшення випадків перебоїв у роботі залізничного та автомобільного транспорту намагаються скоротити транспортні витрати та покращити логістику перевезень. Перевезення внутрішніми водними шляхами розглядається Урядом України як вид транспорту, який необхідно розвивати для підтримки української економіки. Розвиток річкового транспорту, що забезпечує «зелені» перевезення, може мати значний вплив також на соціальний розвиток та навколишнє середовище України. Враховуючи, що економіка України тяжіє до експорту, потенційно водними шляхами Дніпра та Дунаю за умови модернізації шлюзів обсяг перевезення вантажів ВВТ може досягти позначки 45 млн. т. на рік [47]. Вищезазначені дані показують актуальність використання водного транспорту, але його робота напряду залежить від простоїв.

На прикладі танкерів можна констатувати, що вони під час своїх обов'язкових технологічних операцій дуже часто використовують невиправдано високий час простоїв. З періодичністю не менше двох разів на місяць на танкерах проводяться операції, пов'язані з вентиляцією вантажних трюмів за рахунок заповнення інертними газами (продуктами горіння суднового палива). Ця технологічна операція інертизації відбувається з судном практично в кожному рейсі. В середньому за рік кількість виконуваних робіт в залежності від розмірів танкера складає від 20 до 50 разів при середній тривалості процесу вентиляції не менше 30 годин. Основний результат в цьому випадку полягає в зниженні концентрації кисню в трюмі до нормативних значень.

Тому, враховуючі сучасні можливості комп'ютерних систем, особливий інтерес представляє собою використання інформаційних систем підготовки вантажних операцій в застосуванні до танкерів. Але проведений аналіз існуючих системи підготовки вантажних операцій і особливостей прийняття

рішень при інертизації вантажних трюмів показав, що всі відомі інформаційні системи, які використовуються для підготовки вантажних операцій на танкерах не задовольняють вимогам щодо контролю за якістю поточних технологічних параметрів. Тому вирішення важливої науково-практичної задачі скорочення часових витрат на здійснення процесу інертизації вантажних трюмів танкерів, що може бути досягнуто шляхом розробки моделей та методів комп'ютерної підтримки рішень для цього технологічного процесу, є актуальним та своєчасним.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота спрямована на реалізацію: Постанови Верховної Ради України (від 31.03.2016 № 1073–VIII) "Реформи галузі інформаційно-комунікаційних технологій та розвиток інформаційного простору України"; Закону України "Про Національну програму інформатизації", (від 1998, № 27–28, ст.181 програмам і планам виконання фундаментальних науково-дослідницьких праць Міністерства освіти і науки України і Одеського національного політехнічного університету впродовж періоду 2017–2020 рр., а результати проведених досліджень відповідають завданням державної науково-дослідної теми № ДР 0115U000419 "Автоматизоване моделювання надійності технічних об'єктів з навантаженням резервуванням", в якій авторка була співвиконавцем одного з розділів.

Мета і задачі дослідження. Мета роботи полягає в скороченні часових витрат на здійснення процесу інертизації вантажних трюмів танкерів за рахунок розробки моделей та методів та комп'ютерної підтримки рішень на основі моделювання та візуалізації аеродинамічних потокових даних при інертизації.

Для досягнення мети вирішено наступні задачі:

- проаналізувати існуючі інформаційні системи та засоби підготовки вантажних операцій на танкерах та засоби комп'ютерної підтримки процесу інертизації вантажних трюмів та визначити шляхи скорочення часових витрат на здійснення процесу інертизації;

- розробити класифікацію рівнів обчислювальної складності гідродинамічних рівнянь для моделювання руху обмеженого потоку та на її основі універсальну модель обчислення потокових даних для довільних технологічних процесів на суднах водного транспорту;

- розробити моделі та методи обчислення потокових даних та підтримки прийняття рішень при інертизації вантажних трюмів танкерів.

Об'єктом дослідження є процес прийняття рішень в інформаційних системах підготовки операцій на танкерах.

Предметом дослідження є методи, моделі та інформаційна технологія підтримки рішень в інформаційних системах підготовки вантажних операцій в трюмах на танкерах.

Методи дослідження. В ході виконання дисертаційних досліджень використані: об'єктно-орієнтоване програмування, методи чисельної та експериментальної візуалізації, методи порівняльного аналізу та математичної статистики, теорія розмірності, методи кінцевого об'єму та кінцевих різниць, чисельні методи та методи кластеризації.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в розробці та вдосконаленні моделей та методів комп'ютерної підтримки рішень на основі моделювання та візуалізації потокових даних при інертизації для скорочення часових витрат на здійснення процесу інертизації вантажних трюмів танкерів, а саме:

- вперше розроблено багаторівневу класифікацію моделей за рівнями обчислювальної складності систем диференціальних гідродинамічних рівнянь для моделювання аеродинамічних потокових даних в обмежених умовах, що дозволило проводити кількісний та якісний аналіз процесу інертизації трюмів танкеру з різними часовими витратами та різними рівнями якості прийняття рішення ОПР;

- удосконалено модель обчислення аеродинамічних потокових даних за рахунок їх чотирьохвимірною відтворення з подальшим представленням у вигляді одновимірних масивів та їх подальшого обчислення з урахуванням

результатів попередніх розрахункових рівнів, що дозволяє знижувати час обчислень АПД при незначному збільшенні ресурсів оперативної пам'яті комп'ютера;

- отримав подальший розвиток метод обчислення потокових даних на основі запропонованої їх чотирьохвимірної моделі, який полягає в розщепленні багатовимірного процесу на послідовність одновимірних, на підставі узагальненого принципу Гюйгенса–Адамара, що дозволило значно скоротити час моделювання процесу інертизації судна та забезпечити візуалізацію релевантної інформації для прийняття рішень щодо підготовки вантажних операцій на танкерах;

- вперше запропонований метод підтримки прийняття рішень при інертизації вантажних трюмів танкерів, який базується на використанні розробленої класифікації рівнів обчислювальної складності, удосконаленої моделі обчислення аеродинамічних потокових даних та методі їх обчислення, що дозволяє розробити інформаційну технологію для комп'ютерної підтримки рішень та дає можливість значно скоротити технологічний час процесу інертизації.

Практична цінність отриманих результатів полягає в наступному:

- створена нова система класифікації рівнянь руху за рівнями складності, яка дозволяє створити теоретичний базис для розробки нових програмних продуктів по візуалізації основних характеристик рухомого потоку;

- запропоновані нові принципи відображення основних гідродинамічних характеристик потоку, що рухається, на основі використання градієнтних характеристик;

- розроблено нову технологію візуалізації аеродинамічних потокових даних при роботі системи інертизації вантажних трюмів танкерів, яка скорочує час робочого процесу і підвищує якість контролю ОНР;

- створено програмне забезпечення комп'ютерної підтримки рішень, яке дозволяє при використанні на судах водного транспорту контролювати всі параметри роботи системи інертизації вантажних трюмів.

Основні результати дисертаційних досліджень реалізовані в роботі судноплавної компанії офшорного флоту BOURBON Marine Services Greenmar (Додаток А) та в навчальному процесі Одеського національного політехнічного університету для методичного забезпечення спеціальності 126 – інформаційні системи та технології при створенні курсу лекцій і лабораторних робіт дисциплін: «Методи та системи підтримки прийняття рішень», «Системи підтримки прийняття рішень та прогнозування на основі сховищ даних», «Методи та технології обробки інформації», що підтверджено відповідними актами впровадження (Додаток Б).

Персональний внесок здобувача. Всі наукові положення, висновки та рекомендації, що містяться в дисертації, отримано здобувачем особисто. В роботах, які написано в співавторстві, автору дисертації належать:

[39] – загальний опис технології інертизації вантажних трюмів танкера;

[40] – аналіз виразів для опису епюри швидкості потоку та опис результатів чисельних розрахунків;

[43] – опис загальних принципів формування програмного комплексу для застосування інформаційних технологій на танкері;

[53] – формулювання та опис загальних принципів та методу використання нової інформаційної технології у застосуванні до суднових технологічних процесів, що базуються на рухомих потоках рідини та газу;

[54] – опис та аналіз методів, що використовуються під час візуалізації рухомих потоків;

[55] – аналіз способу отримання рішення задач оптимізації в умовах проектної діяльності;

[56] – опис та аналіз методів візуалізації потоків з використанням загальних положень теорії тепло- та масопереносу;

[57] – аналітичний огляд та формулювання загальних характеристик процесу фільтрації газів з довільними граничними умовами;

[90] – опис, статистична обробка та побудова результатів вимірювання робочих параметрів при використанні оброблених емульсій палива з водою;

[91] – опис загальної структури, діалогових вікон і основних принципів використання розробленої інформаційної технології при проведенні процесу інертизації вантажних трюмів танкера;

Апробація результатів дисертації. Основні положення роботи та окремі її розділи доповідалися і отримали схвалення на науково-технічних конференціях професорсько-викладацького складу Одеського національного політехнічного університету 2017-2020 рр.

Також результати дисертації отримали апробацію на наступних конференціях: V Українсько-німецька конференція Інформатика. Культура. Техніка. Одеса, 2017; Науково-технічна конференція “Річковий та морський флот експлуатація і ремонт”, Одеса, 2017; IV Міжнародна науково-практична конференція Summer InfoCom Advanced Solutions 2017. Київ, 2017; VI Українсько-німецька конференція Інформатика. Культура. Техніка. Одеса, 2018; IX Міжнародна науково-практична конференція «Сучасні підходи до високоефективного використання засобів транспорту», Ізмаїл. 2018; XXVII семінар: Моделювання в прикладних наукових дослідженнях, Одеса, 2019; Информационные управляющие системы и технологии, Одесса, 2019; Науково-технічна конференція “Морський та річковий флот: експлуатація і ремонт”. Одеса, 2020.

Публікації. Результати дисертації викладені у 13 наукових публікаціях, серед них 5 – у фахових збірниках, з яких 2 статті опубліковані без співавторів і 1 – у періодичному науковому виданні інших держав, а також 8 тез та доповідей апробаційного характеру на міжнародних конференціях.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ПРОЦЕСУ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ В ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ ПІДГОТОВКИ ВАНТАЖНИХ ОПЕРАЦІЙ

1.1. Аналіз особливостей процесу інертизації вантажних трюмів

Практичне значення процесу інертизації для танкера є дуже важливим. Цей технологічний процес є за міжнародним законодавством обов'язковим для кожного танкера при зміні типу вантажу. Ця технологічна операція відбувається з судном практично в кожному рейсі. В середньому за рік кількість виконуваних робіт в залежності від розмірів танкера складає від 20 до 50 разів. Середня тривалість процесу вентиляції визначається розміром танкера і на сьогоднішній день становить не менше 30 годин.

Всі вантажні трюми танкера при зміні рідкого вантажу (нафти, бензину, дизельного палива і т.п.) обслуговуються судновою системою інертних газів. Її принцип роботи заснований на спалюванні палива в спеціальному пристрої. Його називають генератором. Димові гази, які виходять під час спалювання проходять через різні технологічні установки, які призначені для їх обробки (очищення, охолодження і т.і.) і потім подаються безпосередньо в вантажні трюми. Оскільки щільність димових газів перевищує щільність повітря, то при їх попаданні в замкнений простір вантажного трюму вони поступово витискують повітря. Це робиться для того, щоб в кінцевому підсумку всередині трюму весь простір не містив кисень і був заповнений димовими газами. Залишкова концентрація присутнього в трюмі кисню в кінці такого технологічного процесу повинна складати величину менше 5 %. За рахунок цього буде відтворена безпечна мікроатмосфера всередині вантажних трюмів танкера, а ймовірність появи вибуху або пожежі буде знижена практично до нульових значень.

Крім різниці щільності двох газових потоків (продуктів згоряння і повітря) позитивний градієнт швидкості їх руху забезпечується також за рахунок надлишкового тиску всередині трюму. Зазвичай його величина перевищує атмосферний тиск на 20 %, що перешкоджає притоку зовнішнього повітря всередину трюму.

З точки зору гідродинамічних процесів створення та постійне підтримання в трюмах безпечної мікроатмосфери описується досить добре вивченими процесами дифузії та конвекції. Ці процеси характеризуються невисокими швидкостями руху (змішування) потоків димових газів і повітря і описуються рівняннями, які наведені нижче в розділі 2.

З економічної точки зору якість процесу вентиляції визначається тільки одним параметрів - часом, який витрачається на процес зниження концентрації кисню всередині трюму до заздалегідь заданої величини. Використання примусової подачі інертних газів для прискорення масообмінних процесів призводить до значної економії грошових витрат на роботу системи інертних газів [90, 91]. У грошовому еквіваленті скорочення часу видалення повітря з вантажних трюмів на танкерах, що мають дедвейт від тридцяти до п'ятидесяти тонн з тридцяти до п'ятнадцяти годин в середньому може становити від шістидести до ста тисяч американських доларів на рік.

Головною причиною великої тривалості процесу видалення повітря з трюмів танкера є недосконалість технологій, що використовуються [46]. У цьому практично важливому прикладі з точки зору інформаційних технологій можна констатувати повну відсутність поточного моніторингу концентрації повітря всередині трюму. Діаграма, що показує взаємний вплив поточних значень концентрації кисню і вуглеводнів, на можливість вибуху або пожежи у вантажному трюмі танкера показана на рисунку 1.1. На ній у вигляді контурних зон позначені гранично допустимі значення концентрацій кисню і димових газів.

У застосуванні до даного робочого процесу на морських судах до теперішнього часу інформаційні технології, практично, не застосовувалися.

Можна констатувати, що використання візуалізації чисельних даних для відображення АПД процесу заповнення робочих обсягів трюмів танкера інертними газами призведе до дуже позитивних практичних результатів.

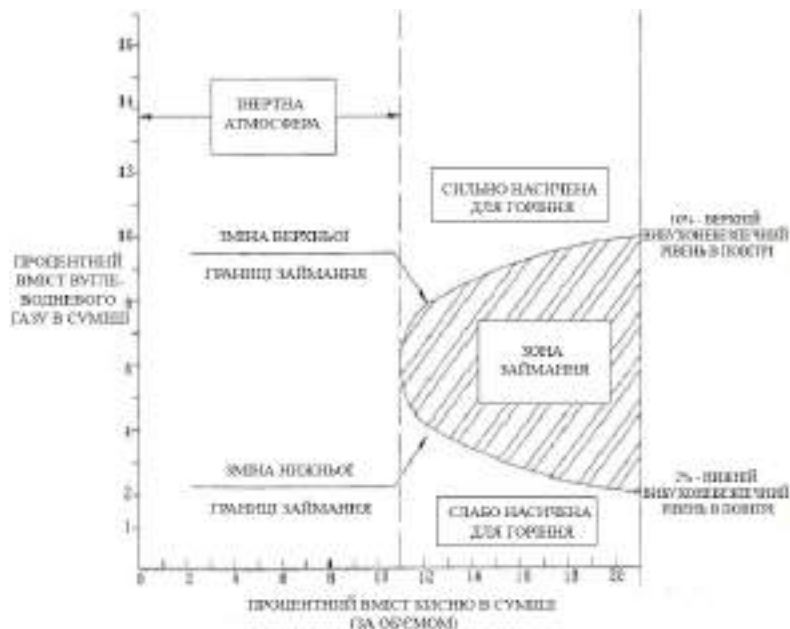


Рисунок 1.1 – Загальна діаграма процесу зниження концентрації кисню в вантажних трюмах на танкері

На підставі виконаного аналізу особливостей процесу інертизації вантажних трюмів та існуючого інформаційного забезпечення був зроблений висновок: всі відомі інформаційні системи, які використовуються для підготовки вантажних операцій на танкерах не задовольняють вимогам щодо контролю за якістю поточних технологічних параметрів [39]. Такий недолік призводить до невиправдано високих значень часу отримання інформації щодо безпечної концентрації кисню на основі аналізу аеродинамічних потокових даних (АПД) всередині трюму, що призводить, як наслідок, до невиправданого високого часу простоїв танкерів.

Проблема створення комп'ютерної підтримки рішень в інформаційних системах підготовки вантажних операцій на танкерах є дуже актуальною для дуже широкого спектру технічних процесів і технологічних об'єктів.

1.2. Аналіз інформаційного забезпечення для моделювання та візуалізації аеродинамічних потокових даних

В даний час в світі використовується велика кількість різних продуктів, які призначені для вирішення задач моделювання та візуалізації аеродинамічних потокових даних (АПД). Велика їх частина працює з використанням методів обчислювальної гідромеханіки, сукупність яких прийнято позначати, як - CFD (Computational Fluid Dynamics). У більшій частині такого програмного забезпечення передбачена візуалізація отриманих результатів, при цьому до сьогодення відсутні інформаційні системи, які використовуються для підготовки вантажних операцій на танкерах. Все відоме інформаційне забезпечення та його основні складові не задовольняє вимогам щодо контролю за якістю поточних технологічних параметрів. Таке інформаційне забезпечення присвячено виключно візуалізації чисельних баз даних для опису процесу руху гідродинамічних потоків. Можна стверджувати, що практично все відоме сучасне програмне забезпечення при відтворенні отриманих результатів АПД використовують стандартні прийоми візуалізації.

До числа існуючого інформаційного забезпечення, що найбільш часто використовуються для вирішення завдань гідродинаміки можна віднести:

FLOW VISION. Цей програмний продукт призначений для комплексного вирішення просторових задач про рух потоку на основі різних рівнянь гідродинаміки [86]. Стадія візуалізації в ньому відповідає постпроцесінгу і розглядається тільки як одна із складових частин [30].

Згідно з роботою [30]: "Візуалізація в FlowVision-HPC (High Performance Computing) є розподіленою і частково паралельною: сервер візуалізації здійснює паралельну побудову візуальних даних у векторному вигляді (генерує тривимірну сцену). Потім ці дані передаються на препостпроцесор, який здійснює непаралельну побудову зображення на екрані. Плюсом даного підходу є те, що після того, як тривимірна сцена згенерована, можливий її

перегляд в різних режимах і при різних положеннях спостерігача без участі сервера візуалізації і передачі даних з нього. Мінусом же даного підходу є те, що побудова зображення для виведення на екран здійснюється на одній обчислювальній машині, тому розмір і складність сцени обмежені можливостями цієї машини."

DaVis (компанія LaVision). В основі цього програмного продукту при обробці АПД і зображень рухомого потоку та їх кінцевій візуалізації для користувача лежить використання методу крос-кореляції. Стандартний алгоритм роботи програмного комплексу DaVis має на увазі виконання чотирьох операцій: розбивку вихідного образу на рівноцінні розрахункові площадки; розрахунок крос-кореляційної функції для кожної ділянки; знаходження максимального значення цієї функції; інтерполяцію максимуму кореляційної функції між пікселями.

FlowSight. В основі цього програмного продукту лежить комплексне використання різних методів візуалізації - структурування потоку, метод трасування (часток в потоці), побудова ізоліній і поверхонь. Процес візуалізації оснований на використанні хмари попередньо отриманих вихідних даних про характер руху потоку.

ANSYS Fluent. В основі цього програмного продукту лежить використання класичного кінцево-різницевого методу, який при моделюванні турбулентних потоків доповнюється одною з варіацій вихривий моделі турбулентності - модель SAS (Scale Adaptive Simulation) [21].

При вирішенні більшості технічних завдань в ньому використовується пов'язаний алгоритм побудови багаторівневих сіток. Головна відмінність побудови розрахункових сіток, що відтворюють реальний обсяг течії, полягає в використанні не класичних прямокутних обсягів, а тетраедрів. За рахунок такого додавання додаткових розрахункових вузлів забезпечується більша збіжність і стійкість обчислювального процесу.

За аналогією з попередніми програмними комплексами в ANSYS Fluent також використовується інтерактивна графіка. Її основним призначенням є

коригування вихідних даних і геометрії розрахункового обсягу перед початком процесу моделювання.

На підставі виконаного аналізу існуючого інформаційного забезпечення підтримки рішень та його основних складових – методів моделювання та візуалізації стану АПД всередині трюму довільної конфігурації при його інертизації. Показано, що існуючі методи моделювання та візуалізації АПД не в повній мірі забезпечують вимогам щодо релевантності інформації в суднових системах інертизації вантажних трюмів, що призводить до високих часових витрат на здійснення процесу інертизації вантажних трюмів.

Для поліпшення методів візуалізації АПД на початковій стадії було сформульоване наступне: при візуалізації необхідно використовувати не специфічні характеристики або параметри потоку в поточний момент часу, а їх математичне подання у вигляді набору операторів векторної алгебри.

До таких специфічних характеристик з використанням скаляра - тиску P і вектора - швидкості, V відносяться:

– градієнт скалярного поля (мінливість)

$$\text{grad } P = \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial P}{\partial z} \quad (1.1)$$

– дивергенція (розбіжність), скалярний диференціальний оператор поля вектора $\vec{v}$

$$\text{div } \vec{V} = \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z}. \quad (1.2)$$

– ротор (вихор), векторний диференціальний оператор векторного поля

$$\text{rot } \vec{V} = \left[\frac{\partial v_z}{\partial y} - \frac{\partial v_y}{\partial z} \right] + \left[\frac{\partial v_x}{\partial z} - \frac{\partial v_z}{\partial x} \right] + \left[\frac{\partial v_y}{\partial x} - \frac{\partial v_x}{\partial y} \right]. \quad (1.3)$$

Запропоновано для візуалізації АПД використовувати чисельні значення характеристик потоку з поточного та попередніх часових рівнів. За рахунок такого підходу для будь-якої гідродинамічної течії при візуалізації можливо відображати з високою якістю тенденцію зміни будь-яких параметрів, які цікавлять користувача. До теперішнього часу в інформаційних технологіях такий підхід в візуалізації АПД не використовувався.

Застосування операторів векторної алгебри до побудови картини візуалізації будь-якого АПД дозволить показувати локальну зміну характеристик з можливістю проведення кількісного аналізу. Такий аналіз можливо проводити вже не тільки по всій області гідродинамічної течії, що відображається, але і в конкретних локально виділених ділянках потоку. У цьому випадку можливо вирішити головне питання візуалізації - створення стаціонарного способу візуалізації, який відображає динаміку зміни особливостей АПД. До таких особливостей можна віднести: виникнення зон відриву потоку на зламах жорстких поверхонь обтічного тіла; виникнення і подальше існування застійних областей в напівзамкнених або кутових зонах тривимірних просторів; виділення областей з стійкими вихровими зонами; виникнення хвильових або періодично повторюваних течій і т.і.

На даний час в описі (документації, опціях довідки, презентаціях і т.п.) всіх відомих в світі програмних комплексів (описаних вище), які використовуються для розрахунку і візуалізації аеродинамічних поточкових даних майже повністю відсутня інформація про те:

- які рівняння (в сукупності з початковими і граничними умовами) і методи їх вирішення використовуються для відтворення на комп'ютері процесу руху потоку;
- які критерії стійкості обчислювального процесу використовуються під час чисельного моделювання АПД;
- яким чином усуваються проблеми розбіжності обчислювального процесу через "чисельну в'язкість" що виникає за рахунок використовуємих

типів даних і архітектури комп'ютера (процесорів, 32 або 64 бітової розрядної системи і т.п.);

– які методи статистичної обробки та представлення результатів використовуються при візуалізації отриманих результатів.

Через вказані недоліки була вирішена задача про розробку моделі розрахунку параметрів візуалізації на підставі класифікаційної системи основних рівнянь руху. На її основі доцільно розробляти нові програмні комплекси для моделювання і візуалізації руху АПД.

1.3. Комп'ютерна підтримка рішень під час процесу інертизації вантажних трюмів танкера

Під час комп'ютерної підтримки рішень варто враховувати, що невід'ємною частиною циклу управління є не тільки саме прийняте рішення, а й подальша або остаточна відповідальність за результат, що буде отриманий [60]. У застосуванні до суден водного транспорту на теперішній час можливо констатувати, що у більшості випадків експлуатації рішення приймалися тільки з використанням досвіду роботи командного складу судна (капітан, старший помічник, головний механік) [92].

В даний час посилюється роль інформаційних технологій автоматизації функцій виробничого і організаційного управління для вирішення ряду проблем щодо підвищення ефективності і рентабельності експлуатації суден водного транспорту [84]. Одна з найбільш істотних проблем полягає в тому, що в більшості випадків практично на всіх сучасних вантажних суднах водного транспорту для конкретних технологічних процесів, наприклад, спалювання палива в головному двигуні, практично не використовують інформаційні технології.

В якості наглядного прикладу можна привести взятую з роботи [102] загальну структуру комп'ютерної підтримки рішень (КПР), що зображена на

рисунку 1.2. Як це видно її складові блоки відповідають за основні технологічні операції. Всі компоненти комп'ютерної підтримки рішень можуть бути поділені на сховища даних і аналітичні засоби. Сховище даних відповідають загальному та організованому в структурах середовищу зберігання даних процесу. Аналітичні засоби відповідають за зможу доступу до своїх сервісів кінцевого користувача під час керування процесом.



Рисунок 1.2 – Загальна структура комп'ютерної підтримки рішень. Взято з [102]

Головними компонентами такої загальної структури КПР є база даних (БД), база моделей (БМ) і пропрограмна підсистема. Остання містить в своїй структурі: систему управління базою даних (СУБД), системи управління базою моделей (СУБМ) і системи управління інтерфейсом між користувачем і комп'ютером.

Недоліком цієї системи є неможливість використання даної системи на суднах. На суднах практично відсутнє спеціалізоване програмне забезпечення підтримки рішень. Серед відомих систем, які дозволяють приймати потенційно обгрунтовані рішення, можливо виділити: систему управління середовищем у вантажних танках; системи водяного баластування; систему управління температурою і тиском всередині танків і вантажних трубопроводів; систему аварійно-попереджувальної сигналізації.

Всі перераховані системи не є автоматизованими, не підтримуються необхідними ІТ і працюють виключно за рахунок ручного регулювання людиною-оператором на основі отриманих результатів вимірювання від технічних приладів.

У застосуванні до процесу витіснення повітря з трюмів танкера для отримання концентрації кисню менше 5 % можуть використовуватися різні засоби і методи прийняття рішень. Їх варіативність достатня широка і може включати в себе використання:

- суб'єктивних підходів найпростішого рівня на базі колективного методу прийняття рішень;
- об'єктивного підходу на основі точного методу математичного опису процесу.

Саме другий напрямок і був предметом виконаних досліджень дисертаційної роботи. Для цього запропоновано розробити програмне забезпечення комп'ютерної підтримки, яке дозволяє на основі сучасних математичних методів отримувати результати релевантну інформацію для прийняття рішень [35]. Незважаючи на великий спектр програмних кодів, бібліотек і алгоритмів, сучасні математичні методи в основному використовуються тільки в загальних, а не конкретних завданнях щодо підтримки рішень [34]. У застосуванні до конкретних технологічних процесів під час підтримки рішень можуть бути використані тільки окремі програми обробки даних. В основному ці програми пов'язані з автоматизованими системами підтримки прийняття рішень (АСППР) на основі роботи контрольно-вимірювальної апаратури і не можуть розглядатися як надійні експертні системи прийняття рішень (ЕСПР) [59].

Інформаційна технологія для комп'ютерної підтримки рішень (ІТ КПР) при експлуатації на танкері повинна розглядатися як один з підвидів інтелектуальних обчислювальних систем.

З точки зору поліпшення методів комп'ютерної підтримки рішень при управлінні технологічними процесами ІТ КПР повинна бути реалізована у

вигляді інформаційного забезпечення [26]. Робота такого програмного забезпечення повинна імітувати спосіб вибору рішення по аналогії з роботою експерта, який на основі отриманих даних візуалізації приймає остаточне рішення в реальних умовах функціонування технології або технічного об'єкта.

Інформаційна технологія для комп'ютерної підтримки рішень (КПР) повинна надавати користувачеві можливість накопичення, систематизації, обробки і візуалізації уявлення професійних знань інших експертів. Ця можливість безпосередньо визначається появою нових експертних оцінок при прийнятті рішень в тих конкретних областях знань, в яких вирішувані завдання не містять формалізованого рішення. Також нова експертна оцінка прийняття рішення повинна враховуватися і в разі слабо формалізованих задач [4].

В роботі реальних технологічних об'єктів може мати місце неструктуровані або слабоструктуровані ситуації для вибору остаточного рішення. Головна відмінність комп'ютерної підтримки рішень полягає в тому, що вона призначена для підтримки людини, яка приймає рішення тільки на рівні рекомендацій, які тільки розширюють його здатності. Для управлінського персоналу, що приймає рішення - КПР ніколи не може виконувати функції заміни. При їх використанні остаточне рішення або думка щодо подальших дій залишається тільки за людиною. Інша відмінність у цільовій спрямованості полягає у використанні двох принципово різних підходів.

Перший підхід заснований на наданні рекомендацій і допомоги управлінцю, який використовує програмний продукт.

Другий підхід заснований на заміні системою прийняття рішення самого управлінця, тобто прийняття рішення без людини.

Другий напрямок в разі високого ступеня відповідальності при ухваленні рішення завжди має використовувати антропоцентричний підхід - об'єднання прийнятого технічного рішення з урахуванням характерних особливостей функціонування навколишньої екосистеми. Рішення повинно прийматися з урахуванням забезпечення її подальшого стійкого функціонування. Складність прийняття рішення безпосередньо визначається

невизначеністю самої предметної області. Поскілки кожен технологічний процес є унікальним, задача забезпечення прийнятого технічного рішення при інертизації доси не вирішена.

Проблема комп'ютерної підтримки рішень є одним з головних регресорів при створенні комерційного інформаційного забезпечення. Саме з цієї причини програмні продукти цих систем підтримки рішень обмежені класами ERP (Enterprise Resource Planning) і CSRP (Customer Synchronized Resources Planning).

Можна констатувати, що систем рівня ERP II (Enterprise Resource and Relationship Planning) в реальних технологічних процесах практично немає. Виняток становлять комерційні продукти високої вартості в таких областях як: космічні технології, захисні системи технологічних об'єктів з високим рівнем аварійних наслідків (атомні реактори, хімічні виробництва) і т.п.

В ході аналізу існуючого інформаційного забезпечення був зроблений висновок - проблема створення і експлуатації ІТ КІР є дуже актуальною, вимагає свого вирішення в різних галузях технічних додатків і повинна бути впроваджена в практику управління з підтримки рішень для дуже широкого спектру технічних процесів і технологічних об'єктів з урахуванням особливостей цих процесів та об'єктів.

1.4. Способи відображення аеродинамічних потокових даних

Інформаційне забезпечення підтримки рішень під час операції інертизації вантажних трюмів танкера повинно використовувати інформацію, що відображає загальні характеристики фізичних процесів, що протікають всередині робочого обсягу вантажних трюмів [119].

У процесах перенесення теплоти і маси використовується досить обмежений набір первинних характеристик і параметрів, які їх описують.

Відповідно до інформаційних оглядів, що представлені в роботах [31, 32, 63] більшість параметрів описує:

- фізичні властивості речовини, так звані головні параметри стану, наприклад: щільність, питомий об'єм, температура, в'язкість, поверхневий натяг, пружність і т.п.;

- міру рівноважного стану речовини з точки зору термодинаміки або гідромеханіки, наприклад: тиск, температура, напруженість, швидкість перенесення речовини або енергії, ентальпія, ентропія і т.п.

В теорії розмірностей, що використовується для аналізу різних теплових і гідромеханічних процесів показано, що практично всі параметри властивостей і стану можуть бути записані за рахунок комбінації базових розмірностей [6, 58]. При складанні критеріїв подібності до таких базових одиниць розмірності відносять: кілограм (кг), метр (м), градуси - температурний ($^{\circ}\text{C}$) і кутовий (град), секунду (сек).

Такий підхід до розгляду характерних параметрів рідини чи газу з точки зору інформаційних технологій є не зручним. Основна причина такого недоліку полягає в тому, що при побудові характеристик гідродинамічної течії перераховані вище властивості складно піддаються інформаційному аналізу [94]. У числових масивах вихідних даних вони не економно витрачають виділені для програмних комплексів обсяги пам'яті, вимагають використання більш складних алгоритмів і збільшують час їх процесорної обробки. З цієї причини замість набору чисельних масивів більш доцільним є використання аналітичних виразів або констант, які описують ці властивості. Вони, в програмних комплексах, будуть ще на початковій стадії формувати необхідні інформаційні потоки і в подальшому їх використання буде реалізовуватися з найменшими витратами обчислювальних потужностей використовуваних комп'ютерів.

Першим прикладом такого підходу є видозмінене рівняння Менделєєва-Клайперона, яке дозволяє визначати щільність повітря.

$$\rho = \frac{P_B}{R_B T} + \frac{\psi P_{H.П.}}{R_{II} T}. \quad (1.4)$$

де ρ – щільність повітря, кг/м^3 ; P_B – парціальний тиск сухого повітря, Па; $P_{H.П.}$ – парціальний тиск насиченої водяної пари, Па; ψ – відносна вологість, %; R_B – газова стала для сухого повітря, Дж/(кгК) ; R_{II} – газова стала для пари, Дж/(кгК) ; T – температура, К.

Вираз (1.4) прийнято використовувати в аеро- або гідродинамічних розрахунках для визначення щільності вологого повітря в залежності від зміни температури. Велика частина властивостей рідини і газів описана в спеціальній довідковій літературі у вигляді емпіричних формул, аналогічних по формі запису закону (1.4).

Другим прикладом є аналітичні вирази для розрахунку і візуалізації епюри швидкості. Вони описують гідродинамічний потік, який рухається в ламінарному режимі всередині циліндричної труби або в каналі, обмеженому двома паралельними плоскими стінками. Значення швидкості в довільній взятій точці поперечного перерізу потоку розраховуються за рівняннями:

– циліндрична труба:
$$V(y) = -\frac{P_1 - P_2}{4\mu l} (R^2 - y^2), \quad (1.5)$$

– плоский канал:
$$V(y) = -\frac{P_1 - P_2}{2\mu l} (b^2 - y^2). \quad (1.6)$$

де: $V(y)$ – значення швидкості в довільній точці течії, м/с ; P_1 і P_2 – тиск на початку та наприкінці потоку, Па; R – радіус труби, м; b – ширина каналу, м; y – поперечна координата, яка відраховується вгору або вниз від осі симетрії труби або каналу, м.

У застосуванні до інформаційних технологій був виконаний аналіз основних характеристик нерухомих або рухомих рідин і газів. До параметрів розподілу основних властивостей рухомих газів і крапельних рідин, які є важливими з точки зору їх подальшої візуалізації, можна віднести наступні:

1. *Вектор швидкості при візуалізації*. Цей параметр потоку, що рухається, відображають чотирма способами, які показані на рисунку 1.3. Найчастіше це робиться за допомогою [7], [64], [67], 95]:

– спрямованих стрілок (рис. 1.3-а), масштаб довжини і просторова спрямованість яких обираються і будуються відповідно до знаку і чисельних значень проекцій швидкості на відповідні осі координат;

– колірного розподілу (рис. 1.3-б), коли градації і ступеню інтенсивності кожного кольору присвоюється невеликий діапазон зміни значень швидкості (синій - мала швидкість, червоний – велика швидкість);

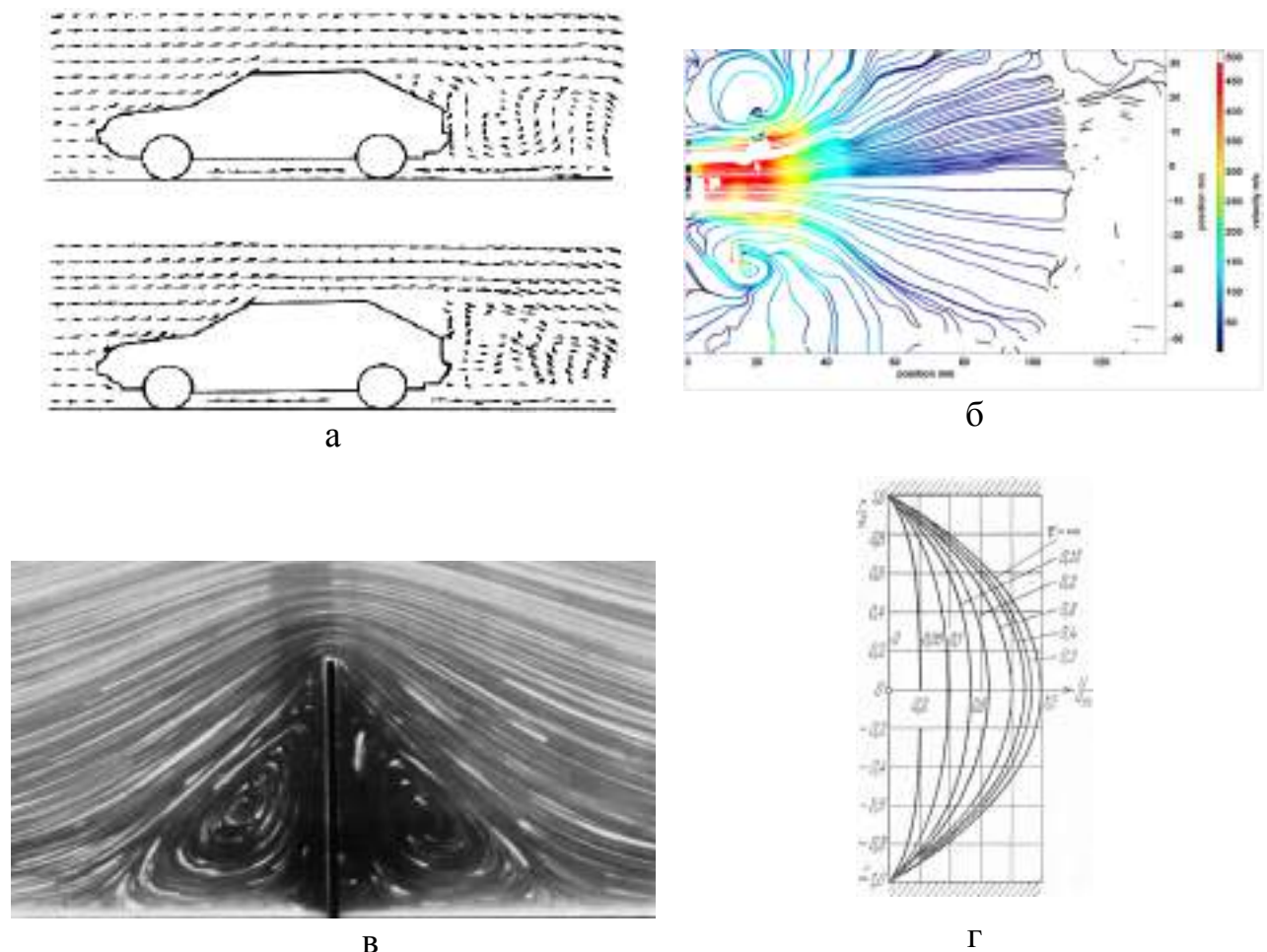


Рис. 1.3 – Візуалізація швидкості рухомого потоку

а – поле швидкості при обтіканні автомобіля [12]; б – поєднання ліній струму з полем миттєвих швидкостей для струменя [24]; в – світлотіньове уявлення поля швидкості при обтіканні бар'єру при $Re=0,014$ [14]; г – розподіл швидкостей під час розгону течії в трубі [62].

- монохромного світлового відображення (рис. 1.3–в),
- графічного відображення (рис. 1.3–г).

З чотирьох показаних способів візуалізації швидкості потоку для проведення кількісного аналізу має сенс тільки колірний розподіл (рис.1.3–б) і графічне відображення (рис. 1.3–г) [75]. На їх основі найчастіше робляться висновки про особливості руху потоку [65].

Решта засобів візуалізації швидкості дозволяють робити тільки якісні висновки про характерні особливості руху гідродинамічного потоку.

2. *Тиск*. При візуалізації цього параметра використовуються два способи, які аналогічні до відображення вектора швидкості. До них відносять: колірне дво- або тривимірне розподілення, а, також, використовується графічне відображення [5].

Використання при візуалізації спрямованих стрілок в силу того, що тиск це скалярна величина не має сенсу [11]. Монохромне світлове відображення при візуалізації поля тиску можливо лише в разі відображення стрибка ущільнення [14]. Оскільки така проблема газової динаміки зустрічається в дуже специфічному і обмеженому числі завдань (аеродинаміка вибухових процесів або руху об'єктів на надзвукових швидкостях) в подальшому цей спосіб візуалізації поля тиску в дослідженнях не розглядався.

В інформаційних технологіях, які використовуються для візуалізації аеродинамічних потокових даних (АПД), відображення величин швидкості і тиску в кожній точці потоку є основним [22], [76]. Використання цих величин передає максимум інформації про особливості даного процесу і дозволяє визначати вихрові зони, точки відриву, межі струменів, кордони зон змішування потоків, напруги, швидкість дифузії і т.п.

3. *Функція струму*, яка являє собою лінію, до кожної точки якої вектор швидкості в даний момент часу спрямований по дотичній. Рівняння такої лінії з умови колінеарності вектора швидкості V і елемента лінії струму dl записується у вигляді:

$$\frac{dx}{V_x} = \frac{dy}{V_y} = \frac{dz}{V_z} \quad (1.7)$$

де V_x , V_y , V_z – проекція швидкості на відповідну вісь координат, м/с; dx , dy , dz – довжина проекції елемента лінії струму на відповідну вісь координат, м.

Приклад візуалізації поля ліній струму наведено на рисунку 1.4–а.

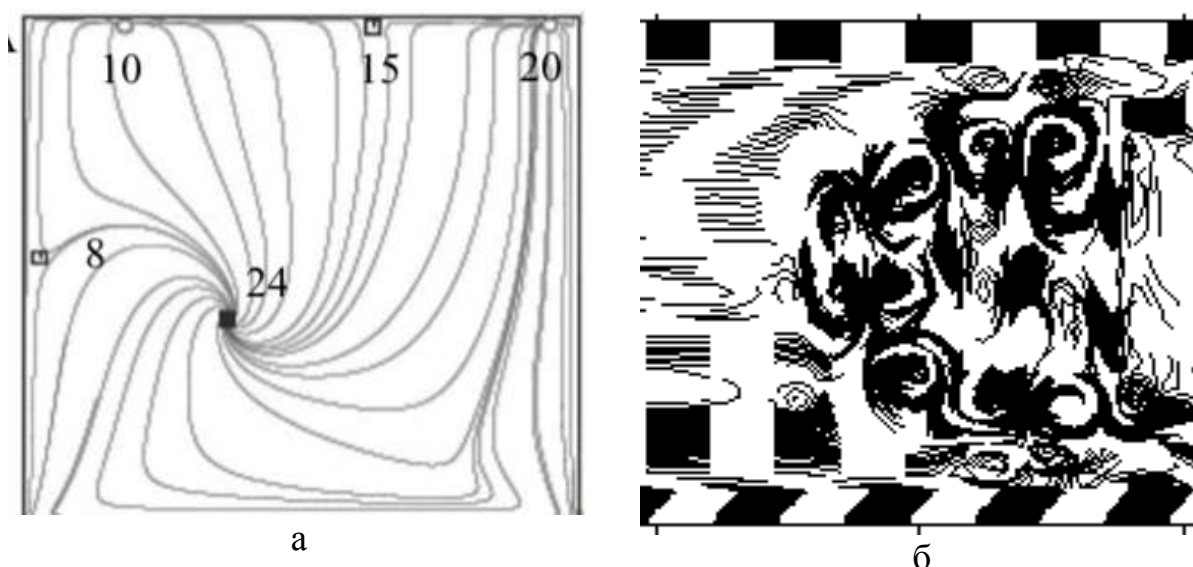


Рисунок 1.4 – Відображення течії у вигляді ізоліній

а – лінії струму при переміщенні рідини по стінці [15]; б – лінії завихреності обмеженого потоку перед диском при $Re=10000$ [37].

При візуалізації рухомих потоків рідини лінії струму використовують дуже часто [93]. Докладний аналіз способів використання рівняння (1.7) і трактування поняття "лінія струму" з точки зору її візуалізації наведені нижче в розділах 1 і 4.

4. *Завихореність*. Будь-яка течія містить крупно і дрібномасштабні вихрові структури, що постійно обертаються. Ступінь інтенсивності їх обертання оцінюється поняттям завихореності [77].

Розподіл завихореності в області рухомого потоку можна візуалізувати за допомогою набору вихорових ліній [80]. Кожна з таких ліній повинна відповідати певному числовому значенню завихореності. У кожній точці

вихорової лінії повинна виконуватися умова колінеарності орта дотичної і вектора складовою "вихрової" швидкості. Рівняння вихрової лінії має вигляд

$$\frac{dx}{\left[\frac{\partial V_z}{\partial y} - \frac{\partial V_y}{\partial z}\right]} = \frac{dy}{\left[\frac{\partial V_x}{\partial z} - \frac{\partial V_z}{\partial x}\right]} = \frac{dz}{\left[\frac{\partial V_y}{\partial x} - \frac{\partial V_x}{\partial y}\right]} \quad (1.8)$$

де dx, dy, dz – довжина проекції елемента лінії завихореності на відповідну вісь координат, м; x, y, z – координати, м

Приклад візуалізації поля завихореності наведено на рисунку 1.4-б.

5. Температура при візуалізації цього параметра використовуються два способи, які аналогічні відображенню величини тиску. Це - колірний розподіл і графічне відображення. Дуже часто під час операції візуалізації значення температури прив'язують до зміни будь-яких комплексних характеристик потоку. Ці характеристики, що сформульовані у вигляді критеріальних залежностей, відображають співвідношення між основними силами, які формують конкретну картину руху гідродинамічного потоку. Найчастіше до таких сил відносять сили: інерції, ваги, тиску, поверхневого натягу.

Комплексними характеристиками потоку зазвичай є число Рейнольдса, Пеклі, Струхалю, Вебера, Фруда і т.і. [12]

6. Концентрація речовини в рухомому багатофазному потоці при візуалізації цього параметра використовуються три способи, які аналогічні відображенню вектора швидкості. До них відносяться: колірний розподіл, монохромне світлове уявлення і графічне відображення.

Приклад візуалізації у вигляді монохромного уявлення, яке в роботі [113] використовується для класифікації структури руху всередині циліндричної труби двофазного потоку води і ґрунту, показано на рисунку 1.5. Як видно на цьому рисунку, можливі варіанти структури ґрунтової пульпи відображені дуже якісно.

У програмних комплексах найчастіше розподіл концентрації за обсягом,

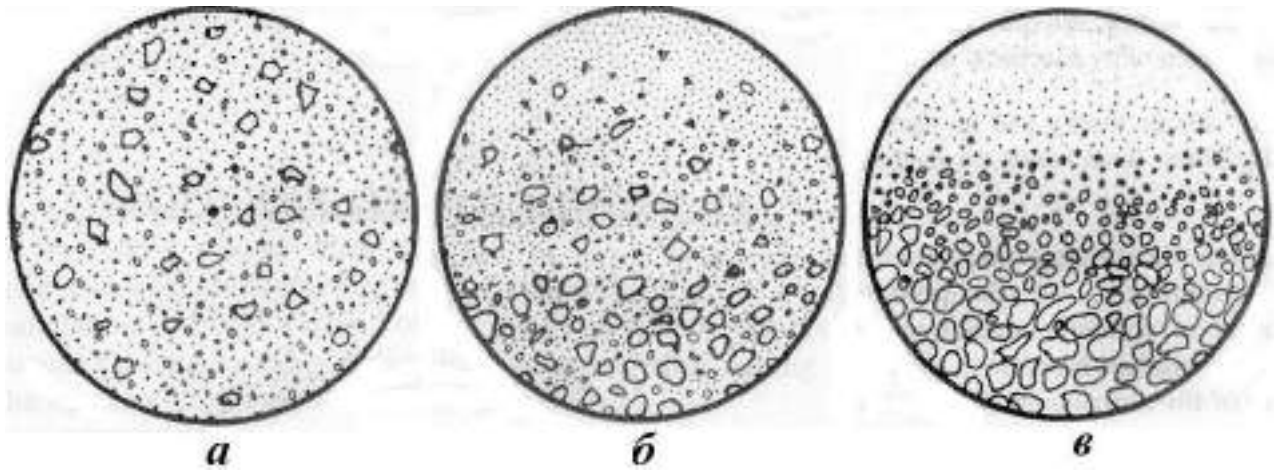


Рис. 1.5 – Структура потоку ґрунту при транспортуванні [113]

а – гомогенний; б – гетерогенний; в – з рухомим осадовим шаром.

який обмежений жорсткими поверхнями, візуалізують за допомогою двох або тривимірних графічних образів [85]. Саме цей спосіб буде використаний і детально описаний нижче в наступних розділах.

Таким чином, виділені вище шість параметрів можуть надавати всю необхідну для користувача інформацію при створенні інформаційних систем, які потребують врахування процесів гідро- і аеродинаміки та результатів їх візуалізації.

Слід відзначити, що залежно від виду гідродинамічного процесу при візуалізації результатів завжди виникає необхідність використання трьох різних координатних систем. Їх використовують для локального позиціонування параметрів, що відображаються. В інформаційних технологіях для характеристики розташування і локалізації конкретного результату можуть використовуватися прямокутна, циліндрична і сферична координатні системи [28].

У прямокутній системі положення довільно взятої точки визначається трьома ортогональними осями X , Y , Z з початком відліку координат від точки перетину цих трьох осей.

В циліндричній системі координат положення довільно взятої точки визначається подовжньою координатною віссю Z , поворотним радіус-вектором

r і кутом його повороту φ . Початок відліку в цій системі відповідає перетину першої точки осі Z і радіус вектора r .

У сферичній системі координат положення довільно взятої точки визначається радіус-вектором r , кутом його повороту φ ($0 \leq \varphi \leq 2\pi$) і полярним кутом θ ($0 \leq \theta \leq 2\pi$). Початок відліку в цій системі відповідає центру сфери, утвореної радіусом r .

У ряді випадків під час візуалізації гідродинамічних процесів використовуються криволінійні координатні системи та такі, що адаптуються самостійно. Їх використання є дуже специфічним. Під час операції візуалізації їх використання не завжди однозначно відповідає відображенню реальних змін характеристик течії [51, 3]. У разі моделювання відривних течій уздовж поверхонь з різкими зламами контуру їх застосування є спірним [37].

При проведенні візуалізації АПД слід враховувати, що для перерахунку координат при переході від однієї системи вимірювання до іншої існує набір коефіцієнтів. Їх називають коефіцієнтами Ляме. Залежно від виду використовуваної або необхідної системи координат їх записують у вигляді [28, 96]:

– декартова система координат:

$$X=X, \quad Y=Y, \quad Z=Z, \quad (1.9)$$

– циліндрична система координат:

$$X=r \cdot \cos\varphi, \quad Y=r \cdot \sin\varphi, \quad Z=Z, \quad r = \sqrt{x^2 + y^2}. \quad (1.10)$$

– сферична система координат:

$$X=r \cdot \sin\theta \cdot \cos\varphi, \quad Y=r \cdot \sin\theta \cdot \sin\varphi, \quad Z=r \cdot \cos\theta. \quad (1.11)$$

1.5. Методи візуалізації аеродинамічних потокових даних для інформаційного забезпечення підтримки рішень при інтертизації вантажних трюмів танкерів

Головним призначенням будь-якого методу візуалізації гідродинамічних процесів є відображення специфічних особливостей рухомого потоку з наданням можливості проведення одночасної чисельної оцінки цих особливостей. В даний час в гідродинаміки існує два напрямки візуалізації течій - відображення експериментальних образів і побудова чисельних результатів рішення використаних рівнянь руху. Предметом виконаних і описаних в подальшому досліджень буде тільки другий напрямок - інформаційна обробка даних і побудова картини візуалізації за допомогою математичної підтримки та відповідного програмного забезпечення.

При складанні загальної класифікації методів візуалізації гідродинамічних потоків були використані роботи [9], [10], [23], [24], [69], [79], [88], [89], [98]. Згідно з наведеними в них результатами в даний час всі методи візуалізації спрямовані на побудову картини перебігу при:

- обробці експериментальних зображень;
- моделюванні за рахунок використання багатовимірної хмари даних, що одержана при вирішенні диференціальних рівнянь відповідних математичних моделей.

Перший напрямок пов'язаний з обробкою результатів фото- або відео фіксації процесу трасування потоку за допомогою різних способів [49]. До основних способів відносять:

- використання світловий рефракції, розсіювання і поглинання;
- використання явищ інтерференції, дифракції і флюоресценції, пропускання зондуєчого пучка швидких електронів і т.і.

В цьому напрямку використовуються наступні методи:

1) PIV – particle image velocimetry (стеження за частками в потоці). У PIV методі кількісна обробка світлового масиву даних здійснюється таким чином [23]:

1. Сканується вихідна інформація у вигляді фотокадру шляхом отримання BMP (*.bmp) файлу. Розширення такого BMP-зображення надає 256 градацій монохромного кольору. При використанні стандартних загальнодоступних програм перетворення цю градацію кольору можливо перевести в чисельну матрицю виділеної або всієї області зображення початкового BMP файлу.

2. В потоці виділяються області з ідентичними градаціями кольору. У більшості випадків таким кольором є сірий. Близькі кольорові значення в виділених областях відповідають ідентичним значенням швидкостей рухомих частинок потоку. У ряді випадків, для збільшення наочності зображень монохромна інтенсивність перетворюється в колірну шкалу [25].

3. Після світлової ідентифікації трасування поля швидкості потоку або його ліній струму за рахунок кросскореляційного аналізу розпізнаються і виділяються контурами характерні області потоку. В більшості випадків до таких замкнених областей відносять вихорові або застійні зони потоку.

Аналогічним чином проводиться обробка файлів відеозйомки гідродинамічних процесів. Різниця полягає в попередньому використанні операції рендеринга - покрокового розкладання кожного кадру відеофайлу на набір статичних двовимірних зображень. Такі зображення зазвичай зберігаються в окремих файлах.

2) Томографічна реконструкція. У цьому методі пошарове зображення поля швидкості можна отримати за рахунок розрахункових операцій, суть яких полягає у визначенні просторового розподілу інтенсивності випромінювання, яке було пропущено через потік, що рухається [45]. В кінцевому підсумку знаходиться двовимірний розподіл лінійного коефіцієнта ослаблення випромінювання, який безпосередньо пов'язаний зі швидкістю рухомого потоку.

Для наведених двох методів схема комп'ютерної обробки експериментального зображення показана на рисунку 1.6.



Рисунок 1.6 – Принципова схема комп'ютерної обробки

Другий напрямок, пов'язаний з використанням при візуалізації аеродинамічних поточкових даних багатовимірної хмари чисельних даних, включає в себе такі методи:

1) PCA–Principal Component Analysis (метод головних компонент).

У PCA методі при аналізі багатовимірного масиву даних проводиться зниження його розмірності з знаходженням головних компонент. Застосування головних компонент дозволяє в подальшому відображати багатовимірну хмару даних на площину або в тривимірний простір, який утворений першими трьома головними компонентами. Перед використанням методу необхідно чітко формулювати необхідну кількість головних компонент для опису багатовимірної хмари даних. У цьому випадку оптимальним є використання

перших трьох головних компонент [13]. Слід зазначити, що використання цього методу через відсутність універсальності є дуже складним і вимагає високих навичок у користувача. На практиці при візуалізації течій RSA метод відтворює тільки обмежений набір модельованих течій.

2) Метод предиктор-коректора.

Використання цього методу передбачає проведення візуалізації вихрових течій на двох послідовних рівнях.

Перший розрахунковий рівень відповідає визначенню числових характеристик для відображення ліній струму і ліній завихореності в потоці.

Другий рівень передбачає коригування отриманих результатів з урахуванням пошуку локального мінімуму тиску.

Для побудови ліній струму і ліній завихореності на початковому рівні використовуються дискретні вузлові точки всього розрахункового обсягу. На другому рівні проводиться виключення тих точок, які не задовольняють умові одночасного збігу мінімуму тиску і максимальних значень завихореності.

3) Метод заповнення (Image inpainting).

Основою цього методу є побудова зображення в локально виділених областях загальної картини візуалізації [66], [105], [106]. Зазвичай такі області характеризуються двома недоліками. Перший - відсутність численних даних для локально виділеної ділянки. Другий - необхідність проведення коригування вихідних даних в силу некоректно виконаної візуалізації (використані дані з похибкою, світлове або кольорове зображення відрізняється від оригіналу і т.п.).

Унікальність методу заповнення полягає в тому, що для коригування способу візуалізації завжди використовуються тільки рівняння руху нестисливої рідини у вигляді системи рівнянь Нав'є-Стокса. Вихідні дані під час процесингу беруться з довколишніх областей [104].

Відмінність методу заповнення від відомих методів обчислювальної гідродинаміки (CFD) полягає в тому, що в цьому методі функція лінії струму розглядається в якості параметра, що відтворює інтенсивність колірною

відображення. При її побудові використовується градієнтно-орієнтована геометрія. Іноді для вирішення завдань, пов'язаних з колірним заповненням виділеного обсягу, використовується функція, яка відповідає переносу завихореності в рухомому потоці.

З точки зору інформаційних технологій метод заповнення застосовується лише до побудови двомірних образів. Використання ліній струму і ліній завихореності як аналоги перенесення даних в області зображення передбачає візуалізацію виключно плескатих течій.

При чисельній обробці "візуалізаційного шуму" відеозображень найголовнішим недоліком методу є необхідність використання отриманих при рендерінгу попередніх і наступних картин візуалізації. Використання так званої "гідродинамічної апроскімації" скорочує застосовність методу до рамок обробки тільки готових зображень. Коректність побудови поля течії при відтворенні нестационарних потоків до теперішнього часу залишається науково необґрунтованою.

При розробці програмних продуктів, призначених для візуалізації АПД відображення образів можна істотно полегшити за рахунок використання різних бібліотек. Як приклад можна привести бібліотеку OpenGL [20]. На цьому ресурсі у великій кількості представлені вихідні коди для малювання просторових образів різних об'єктів.

Окремим напрямком візуалізації також є мова програмної візуалізації MaxScript - вхідна мова 3ds Max.

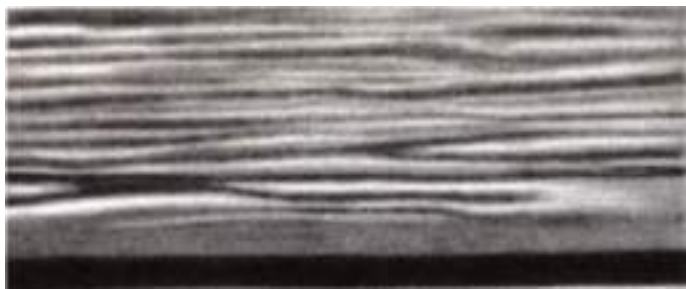
1.6. Засоби графічної побудови полів розподілу параметрів при описі гідродинамічних процесів

Графічне відображення поля течії є одним з ключових механізмів при дослідженні результатів візуалізації гідродинамічних процесів. Під час програмної візуалізації якість відображення визначається [107]:

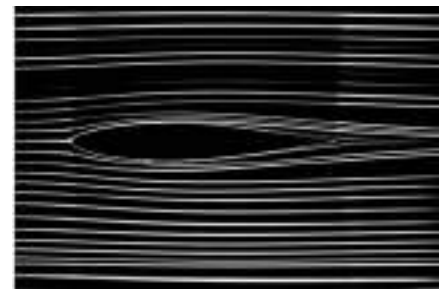
- режимами руху (ламіна́рним, перехідним, турбулентним);
- видом течії (стаціона́рний, квазістаціона́рний і нестаціона́рний потік);
- вибором і інформативністю параметра, який вибирається в якості базового для операції візуалізації;
- методами інтерполяції значень в довколишніх пікселях (вузлах сітки, реперних точках, поверхнях)
- способом побудови образу візуалізації (растровий, мультітональний, статичний або динамічний).

Найпростішим варіантом візуалізації поля течії є набір простих ліній [109]. Ламінарна течія характеризується своєю шаруватістю і з цієї причини лінії струму, лінії рівних потенціалів, епюри швидкості тощо завжди є набором практично паралельних ліній [110]. Приклади подібних тінювих картин візуалізації (в градації сірого кольору) показані на рисунку 1.7.

Геометричний спосіб візуалізації з використанням ліній є найпростішим. У цьому способі якість одержуваних результатів дуже залежить від кількості точок, які дискретно відображають суцільний потік. При візуалізації кількість точок для відображення може задаватися або вручну в інтерактивному режимі або змінюється автоматично з використанням різних математичних операцій [15]: з використанням аналізу щільності інтегральних кривих; тріангуляції Делоне і т.і.



а



б

Рисунок 1.7 – Візуалізація ламінарних потоків

а – експериментальна візуалізація ліній струму в трубі [19]; б – експериментальна візуалізація обтікання профілю при $Re=7000$ [14].

Для візуалізації при геометричному способі можуть використовуватися також і інтегральні поверхні. Зазвичай їх застосовують на структурованих і неструктурованих сітках при побудові полів течій стаціонарних потоків.

Головним недоліком такої візуалізації є потреба в використанні обчислювального часу, який перевищує аналогічний час при побудові візуалізації на базі інтегральних кривих. Згідно за даними роботи [15] при стаціонарному потоці така візуалізація різниця є – в 10 разів, а в нестаціонарному витрати часу збільшуються від 100 до 1000 разів.

Топологічний спосіб візуалізації вихорових областей потоку передбачає використання ліній завихореності і ізобар - ліній постійного тиску [112]. Спільна побудова цих ізоліній надає можливість в програмному комплексі візуально відображати зони виникнення порогових (відривних) значень тиску.

У літературних джерелах, при поданні картин візуалізації полів течій або для демонстрації результатів, що описують характерні особливості потоку, дуже часто використовуються силові лінії у вигляді ліній струму і ліній рівного потенціалу [114].

Перетворені перемінні виду "потенціал ψ - функція струму ϕ " з точки зору якості відображення реальної картини характеризуються обмеженням по розмірності задачі. У разі візуалізації розподілу гідродинамічного параметра на площині коректність такої побудови підтверджується. У двовимірній площині відображення " $\psi - \phi$ " є однозначним, проте в разі тривимірного простору коректність відображення лінії струму в силу неоднозначності її визначення є спірною. Виходячи з рівняння записи просторової лінії струму у вигляді

$$\frac{dX}{V_x} + \frac{dY}{V_y} + \frac{dZ}{V_z} = \phi = const, \quad (1.12)$$

можна стверджувати, що в разі тривимірного простору її відображення неможливо. З цієї причини був сформульован висновок: у всіх існуючих програмних комплексах, в сучасній літературі і в усіх альтернативних джерелах

інформації велика частина наукових результатів візуалізації АПД, що містить просторові лінії струму, не відповідає реальним процесам. У більшості випадків представлена користувачеві візуалізація тривимірної течії в вигляді ліній струму є або фіктивною, або відображає тільки наукові гіпотези про характер руху просторового потоку і не може розглядатися як достовірний науково-виробничий результат.

В інформаційних технологіях для візуалізації двовимірних стаціонарних потоків, де числова база даних для візуалізації являє собою набір скалярних функцій, лінії струму є одним з найбільш якісних варіантів відображення одержуваних при моделюванні результатів. При візуалізації ліній струму побудову поля течії можливо зробити досить легко за допомогою наступного двомірного уявлення

$$V_z dX - V_x dZ = \varphi dXdZ = const, \quad (1.13)$$

де φ – чисельне значення функції струму, $\text{м}^3/\text{с}$.

Значення функції струму φ є непрямим параметром, який можна легко порахувати. Ця величина являє собою величину витрат між двома сусідніми лініями струму.

Порівняння рівнянь (1.12) і (1.13) показує, що при візуалізації гідродинамічного потоку значення лінії струму не враховують додаткові складові поля швидкості в одному з поперечних напрямків руху рідини. Ця невідповідність є суттєвим недоліком. Він може не враховуватися тільки в одному випадку - коли інформаційна технологія використовується для візуалізації результатів рішення повністю симетричною просторовою гідродинамічної задачі. Прикладами таких завдань є: обтікання кулі необмеженим потоком; рух рідини всередині труб з незмінною формою поперечного перерізу; рух одиночного струменя, спрямовані течії в симетрично обмежених областях і т.п.

Для безпосередньої програмної реалізації рівняння (1.13) пропонується в кінцево-різницевому представленні наступного виду

$$\varphi = \frac{V_z[x_{i+1}-x_i]-V_x[z_{i+1}-z_i]}{x_{i+1}-x_i}, \quad (1.14)$$

Якщо в інформаційно-програмному комплексі для візуалізації гідродинамічного течії використовується рівномірна сітка з ідентичним кроком по довжині, то рівняння (1.10) спрощується до виду

$$\varphi = \frac{V_z[x_{i+1}-x_i]-V_x}{x_{i+1}-x_i} \quad (1.15)$$

Після знаходження чисельних значень величини функції струму φ її можна відобразити з використанням різних методів статистичної обробки вибірки ідентичних значень з заданою межею похибки [68], [115].

1.7. Висновки по розділу 1.

1. У першому розділі дисертаційної роботи проаналізовано існуючі системи підготовки вантажних операцій і особливості прийняття рішень при інертизації вантажних трюмів. Показано, що всі відомі інформаційні системи, які використовуються для підготовки вантажних операцій на танкерах не задовольняють вимогам щодо контролю за якістю поточних технологічних параметрів. Це призводить до невиправдано високих значень часу отримання інформації щодо безпечної концентрації кисню на основі аналізу АПД всередині трюму, що призводить, як наслідок, до невиправданого високого часу простоїв танкерів.

2. Проведено аналіз існуючого інформаційного забезпечення підтримки

рішень та його основних складових – методів моделювання та візуалізації стану АПД всередині трюму довільної конфігурації при його інертизації. Показано, що існуючі методи моделювання та візуалізації АПД не в повній мірі забезпечують вимоги щодо забезпечення релевантності інформації для прийняття рішень в суднових системах інертизації вантажних трюмів, що призводить до високих часових витрат на здійснення процесу інертизації вантажних трюмів.

3. Показано, що у більшості випадків при наданні релевантної інформації для комп'ютерної підтримки рішень доцільним є використання не усередненої інформації з баз даних, які містять фізико-хімічні параметри АПД, а результати моделювання АПД з урахуванням аналітичних виразів або констант, які описують їх властивості. Такий підхід дозволить зменшити витрати обчислювальних потужностей.

4. Показано, що для побудови образів візуалізації АПД доцільно застосовувати наступні елементи:

- спрямовані стрілки. Масштаб довжини і просторова спрямованість яких вибираються і будуються відповідно до знаків і чисельних значень проекцій відображуваного параметра на відповідні вісі координат;

- колірний розподіл. Градації і ступеню інтенсивності кожного кольору присвоюється певний діапазон зміни значень (наприклад, синій - мала величина, червоний - велика);

- монохромне світлове відтворення (від білого до чорного кольору в залежності від значень параметра);

- графічне відображення у вигляді кривих і ліній.

5. Візуалізація картини перебігу АПД з використанням перетворених змінних виду "потенціал ψ - функція струму ϕ " є коректною тільки в двовимірних задачах, тому доцільно переходити тривимірних просторів до двовимірних.

6. Застосування операторів векторної алгебри до моделювання та візуалізації АПД при інертизації може виконувати найголовнішу функцію -

показувати локальну зміну характеристик з можливістю проведення кількісного аналізу, як по всій області течії, так і в конкретних локально виділених ділянках потоку.

У зв'язку з перерахованим вище сформульована мета і завдання дослідження.

Метою даної роботи є скорочені часових витрат на здійснення процесу інертизації вантажних трюмів танкерів за рахунок розробки моделей та методів та комп'ютерної підтримки рішень на основі моделювання та візуалізації аеродинамічних потокових даних при інертизації. Для реалізації мети досліджень було сформульовано перелік допоміжних завдань:

- проаналізувати існуючі інформаційні системи та засоби підготовки вантажних операцій на танкерах та засоби комп'ютерної підтримки процесу інертизації вантажних трюмів;
- розробити класифікацію рівнів обчислювальної складності гідродинамічних рівнянь для моделювання руху обмеженого потоку та на її основі універсальну модель обчислення потокових даних для довільних технологічних процесів на суднах водного транспорту;
- розробити методи обчислення потокових даних та підтримки прийняття рішень при інертизації вантажних трюмів танкерів.

РОЗДІЛ 2. МОДЕЛІ КІЛЬКІСНОГО АНАЛІЗУ ТА ВІЗУАЛІЗАЦІЇ ПОТОКОВИХ ДАНИХ ПРИ ІНЕРТИЗАЦІЇ ВАНТАЖНИХ ТРЮМІВ

2.1. Багаторівнева класифікація для моделювання аеродинамічних потоків даних

Оскільки одержання релевантної інформації можливо тільки на основі кількісного та якісного аналізу АПД в трюмі вантажного танкеру, то проведено аналіз математичних моделей руху крапельних і газоподібних рідин в розділі 1.4. Запропоновано провести класифікацію існуючих моделей АПД для отримання інтегральних та локальних характеристик процесу інертизації трюмів танкерів за рівнями обчислювальної складності відповідних рівнянь, які дозволяють моделювати АПД в просторово обмежених умовах трюмів.

При застосуванні інформаційних технологій до конкретних виробничих процесів, де існує необхідність побудови нестандартних образів візуалізації (багатофазні потоки; рідини зі специфічними реалогічними властивостями, особливості обтікання характерних ліній або зламів контуру поверхні тіл і т.п.) розроблена модель та запропонована класифікаційна система можуть завжди доповнюватися новими рівняннями стану потоку [62].

Відповідно до вищесказаного математичний апарат, який використовується в моделі для опису гідродинамічних процесів запропоновано умовно розділити на чотири рівні [42]. Такий поділ пропонується до подальшого використання виходячи з теоретичних основ інформаційних технологій і можливостей сучасного обчислювального забезпечення процесу їх вирішення [43]. Під обчислювальним забезпеченням в даному контексті маються на увазі:

- потужності сучасних комп'ютерів;
- алгоритми, що визначають швидкість роботи з базами чисельних даних;

– математичні методи вирішення нестационарних і нелінійних систем диференціальних рівнянь.

У гідродинаміці в загальному вигляді всі системи диференціальних рівнянь, котрі на сьогоднішній день складають основу для розроблюваних математичних моделей руху крапельних і газоподібних рідин можна розділити на чотири рівні складності. Різниця між цими рівнями полягає в кількості доданків, що входять в рівняння, які описують переміщення і стан потоку. Кожен рівень відповідно відрізняється від попереднього якістю відтворення фізичних особливостей руху, а також урахуванням в'язкості в локально виділеній і/або всієї області течії та градієнта зміни кінематичних характеристик потоку в часі.

Детально ці рівні може бути описані в такий спосіб:

1 рівень складності.

Усі диференціальні рівняння, які можна віднести до першого рівня не відтворюють в'язкісні ефекти. Оскільки в них не враховуються складові, які містять в'язкість при аналізі остаточних результатів можна будувати образи візуалізації тільки на якісному рівні. Такий метод отримання даних для візуалізації не має на увазі проведення на остаточному етапі чисельного аналізу.

Візуалізація поля течії потоку не може бути основою для отримання кількісних висновків.

До рівнянь першого рівня можна віднести одномірне рівняння Бернуллі, яке іноді позначають терміном - інтеграл Ейлера. Його записують у вигляді [6]

$$dz + \frac{dP}{\rho g} + d\left(\frac{V^2}{2g}\right) = 0, \quad (2.1)$$

де z – геометричний напір, м; $\frac{P}{\rho g}$ – п'єзометричний напір, м.в.ст; $\frac{V^2}{2g}$ – швидкісний напір, м.в.ст.

Рівняння (2.1) знаходить своє застосування в найпростіших інженерних додатках і з цієї причини в подальшому в розробці інформаційної технології побудови картин візуалізації АПД розглядатися не буде.

Якісні результати, які в першому наближенні можуть використовуватися для побудови візуалізації потоку, що рухається дозволяє отримувати система рівнянь Ейлера. У тензорній формі запису ця система має вигляд [32]

$$\frac{dV_i}{dt} + V_j \frac{dV_i}{dx_j} = \frac{1}{\rho} \frac{d\tau_{ij}}{dx_j} + \frac{1}{\rho} F_i \}, \quad (2.2)$$

де V_i , V_j – компоненти швидкості, м/с; x_j – поточна координата, м; τ_{ij} – компонента тензора напружень, Па; F_j – складова масової сили, Н.

У разі руху потоку, який характеризується постійною щільністю ($\rho = \text{const}$) ця система дозволяє враховувати довільний характер дії масових сил (сил інерції, ваги і т.п.). Якість одержуваного рішення безпосередньо визначається кількістю розрахункових вузлів, задіяних в програмному комплексі при відтворенні суцільного середовища рухомої рідини дискретним набором точок.

2 рівень складності.

На другому рівні завжди передбачається спільне використання двох систем рівнянь руху потоку рідини або газу.

Перша система має назву диференціальне рівняння прикордонного шару. У цьому випадку вважається, що всі гідродинамічні ефекти, які породжуються виключно в'язкістю рухомого потоку, проявляються в дуже тонкій області, яка межує з іншими твердими поверхнями. Друга область течії приймається потенційною або такою, що вся рідина або газ в ній вважаються ідеальними. Оскільки в другій області модельованої течії в'язкість відсутня, то вона може описуватися рівняннями Ейлера з попереднього першого рівня складності.

Рівняння прикордонного шару, відповідні 2 рівнем складності, називають системою наближених рівнянь Прандтля. У декартовій системі координат їх записують у вигляді [62]

$$\left. \begin{aligned} V_x \frac{dV_x}{dx} + V_y \frac{dV_x}{dy} &= -\frac{1}{\rho} \frac{dP}{dx} + \frac{1}{\rho} \frac{d\tau}{dy} \\ \frac{dP}{dy} &= 0 \end{aligned} \right\}. \quad (2.3)$$

де x, y – просторові координати, м; P – тиск, Па; τ – дотичні напруження, Па.

3 рівень складності.

На цьому рівні складності зазвичай використовують стаціонарні багатовимірні рівняння руху.

З точки зору візуалізації технологічних виробничих процесів цей рівень відповідає повній картині руху потоку, який за час свого переміщення зміг стати повністю усталеним. Вважається, що всі його робочі характеристики в часі не змінюються. В цьому випадку зазвичай використовують систему рівнянь стаціонарного руху в формі рівнянь Нав'є-Стокса. У тензорній формі записи три рівняння цієї системи мають вигляд [33]

$$V_i (\bar{\nabla} V_j) = -g \bar{k} - \bar{\nabla} \left(\frac{P}{\rho} \right) + 2\nu \bar{\nabla} S_v. \quad (2.4)$$

4 рівень складності.

Цей рівень з точки зору інформаційних технологій є найскладнішим. При його реалізації потрібно застосування всієї обчислювальної потужності використовуваного обладнання. В цьому випадку інформаційні потоки і робочі масиви даних є максимальними за своїми обсягами. На етапі реалізації програмного комплексу при використанні четвертого рівня потрібне використання всіх доступних ресурсів пам'яті.

На четвертому рівні використовуються нестационарні багатовимірні рівняння руху Нав'є-Стокса. Також можливе використання нестационарних багатовимірних рівнянь руху Рейнольдса. Ці рівняння зазвичай доповнюються моделями турбулентності у вигляді додаткових систем диференціальних рівнянь з емпіричними коефіцієнтами.

У тензорній формі запису нестационарні рівняння Нав'є-Стокса з урахуванням дії з масових сил лише сили тяжіння мають вигляд [33]

$$\frac{dV_i}{dt} + V_i(\bar{\nabla}V_j) = -g\bar{k} - \bar{\nabla}\left(\frac{P}{\rho}\right) + 2\nu\bar{\nabla}S_v \}. \quad (2.5)$$

де S_v – тензор швидкостей деформації, Па

В тензорній формі запису нестационарні рівняння Рейнольдса мають вигляд [3], [8]

$$\frac{dV_i}{dt} + V_i(\bar{\nabla}V_j) = -g\bar{k} - \bar{\nabla}\left(\frac{P}{\rho}\right) + \frac{1}{\rho}\bar{\nabla}(T_{kl} + T_t) \}. \quad (2.6)$$

де T_{kl} – тензор квазіламінарних напруг, Па; T_t – тензор турбулентних напруг, Па.

Форма запису трьох тензорів, що входять до системи рівнянь (2.5) - (2.6) широко представлена в літературі з гідромеханіки і за необхідністю може бути взята з робіт [31, 32, 33, 36].

Записана система рівнянь Рейнольдса (3.6) містить три рівняння з десятима невідомими функціями, тобто є незамкнутою. Для її замикання найчастіше використовують k – ε модель турбулентності. У цій моделі параметр k це кінетична енергія турбулентних пульсацій, а параметр ε відповідає швидкості дисипації турбулентної енергії.

Диференціальні рівняння k – ε моделі турбулентності мають вигляд [8]

$$\left. \begin{aligned} \frac{dk}{dt} &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu_e \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + \frac{1}{2} \nu_e \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) \\ \frac{d\varepsilon}{dt} &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\nu_e}{\delta_\Sigma} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) + \frac{\varepsilon}{k} \left[\frac{1}{2} C_1 \nu_e \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) - C_2 \varepsilon \right] \end{aligned} \right\} \quad (2.7)$$

У рівняннях (3.7) коефіцієнт ефективної в'язкості ν_e приймається таким, що дорівнює сумі коефіцієнтів ламінарної ν і турбулентної в'язкості ν_t :

$$\nu_e = \nu + \nu_t, \quad (2.8)$$

$$\nu_t = C_D k^2 / \varepsilon. \quad (2.9)$$

Значення емпіричних постійних, що входять у рівняння (2.7) можуть змінюватись в залежності від вигляду течії, що відтворюється під час моделювання. В більшості практично важливих задач найбільш якісні результати можливо отримати з наступними чисельними коефіцієнтами: $C_D=0.09$, $\delta_\Sigma=1.3$, $C_1=1.44$, $C_2=1.9$ [8].

Під час проведення аналізу сучасного стану розвитку математичного апарату було зроблено головний акцент на розробку класифікаційних ознак диференціальних рівнянь руху рідини та газу з точки зору застосування запропонованої моделі під час процесу прийняття рішень з використанням інформаційних технологій.

2.2. Математична модель ізотермічного руху двофазного потоку з перенесенням маси

В якості основи для формулювання математичної моделі був взятий робочий процес заповнення на танкері вантажних трюмів димовими газами з одночасним витісненням повітря. Такий процес, як описано вище передбачає

гідродинамічний рух двофазного газового потоку повітря і більш важких димових газів на малих швидкостях. Також в цьому процесі відбувається масовий обмін (витіснення повітря з трюму) з навколишнім середовищем.

Для візуалізації картини течії була використана система рівнянь руху, яка в попередньому розділі відповідає четвертому рівню складності. Відповідно до діючих масових сил, система нестационарних нелінійних диференціальних рівнянь руху двофазного потоку (2.5) була записана в наступному вигляді [3]

$$\rho \frac{dV_i}{dt} = g \frac{\partial \rho}{\partial C_i} (C_i - C'_i) - \nabla P + \mu \nabla^2 V_i \}. \quad (2.10)$$

де V_i – відповідна проекція швидкості, м/с; P – тиск, Па; C_i, C'_i – концентрація повітря всередині і зовні вантажного трюму, кг/м³; μ – динамічна в'язкість повітря, Па·с.

Система рівнянь (2.10) була замкнена за допомогою рівняння нерозривності.

Димові гази подаються до об'єму вантажного приміщення примусово. Характер їх руху є постійним і практично не залежить від в'язкості. Він відбувається тільки за рахунок дії сили тиску струменя, яка створюється в нижній частині розглянутого обсягу. Для опису характеру руху димових газів була взята система рівнянь з першого рівня складності. Рівняння Ейлера (2.2) в декартовій системі координат записувалися як:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial V_x}{\partial x} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} \\ \frac{\partial V_y}{\partial y} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} \\ \frac{\partial V_z}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} \end{aligned} \right\} \quad (2.11)$$

За рахунок змішування з повітрям концентрація примусово поданих газів постійно змінюється. Її падіння пов'язане з виникаючим дифузійним потоком і описується рівнянням [33]

$$\frac{dC_i}{dt} = D_i \nabla^2 C_i + S_i \quad (2.12)$$

де C_i – концентрація димових газів в обсязі повітря, $\text{кг}/\text{м}^3$; D_i – коефіцієнт дифузії димових газів, $\text{м}^2/\text{с}$; S_i – початкова швидкість димових газів, $\text{м}/\text{с}$.

Для побудови картин візуалізації що відображають поле температур всередині вантажного трюму танкера було використано рівняння, що описує сферичне розподілення тепла. Воно взято з роботи [16] та має вигляд

$$T(r) = \frac{\frac{4\nu\chi\left(-\frac{Q}{2\pi\chi}\right)^2}{c_v}}{2\left(-\frac{Q}{2\pi\chi}-2\right)} \frac{1}{r^2} + \left(T_0 - \frac{\frac{4\nu\chi\left(-\frac{Q}{2\pi\chi}\right)^2}{c_v}}{2\left(-\frac{Q}{2\pi\chi}-2\right)} \frac{1}{r_0^2} \right) \left(\frac{r}{r_0} \right)^{-\left(\frac{Q}{2\pi\chi}\right)} + T_{\text{атм}} \quad (2.13)$$

де T – температура, $^{\circ}\text{C}$; Q – витрата димових газів, $\text{м}^3/\text{с}$; χ – температурна провідність, $\text{м}^2/\text{с}$; ν – кінематична в'язкість, $\text{м}^2/\text{с}$; c_v – питома теплоємність, $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$; r – радіус сфери для розрахунку температури, м ; q – інтенсивність тепловиділення, $\text{Вт}/\text{м}^2$; r_0 – радіус теплового сферичного джерела на якому задана температура, м ; $T_{\text{атм}}$ – температура навколишнього середовища, $^{\circ}\text{C}$.

В якості граничних умов в математичній моделі при моделюванні потоку було прийнято, що на всіх твердих поверхнях виконується умова непротікання потоку. У конкретній реалізації в інформаційних технологіях ця умова реалізується в такий спосіб - у всіх вузлах, відповідних жорстким поверхням всі складові швидкості, а також значення концентрації повітря і димових газів необхідно приймати рівними нулю. Ця умова формулюється з використанням стандартних рівностей виду

$$V_i = C_i = 0. \quad (2.14)$$

Завдання початкових умов по значенням концентрації, а також температурним і кинематичним характеристикам потоку необхідно виконувати відповідно до конкретних даних поточного робочого процесу на танкері.

2.3. Дискретизація основних рівнянь математичної моделі

Рівняння математичної моделі (2.10), (2.11) - (2.13) можна привести до квазілінійну вигляду різними математичними методами. У виконаних дослідженнях це було зроблено за допомогою кінцево-різницевої апроксимації другого порядку точності.

Кожна складова, що входить в основні рівняння математичної моделі, була приведена до запису у вигляді кінцево-різницевої апроксимації. Спосіб дискретизації для всіх складових, визначався просторовим розташуванням розрахункового вузла, в якому в поточний момент часу вирішуються рівняння. Залежно від його відстані до жорстких стінок, де необхідно користуватися граничними умовами, похідні першого і другого порядку виражалися різними формулами.

Схема використання центральних і односпрямованих різниць показана на схематичному рисунку 2.1.

Загальне схематичне представлення методу розстановки розрахункових вузлів в першому квадраті розрахункової області, яка в подальшому блоці програмного комплексу використовується, як область візуалізації показана на рисунку 2.2.

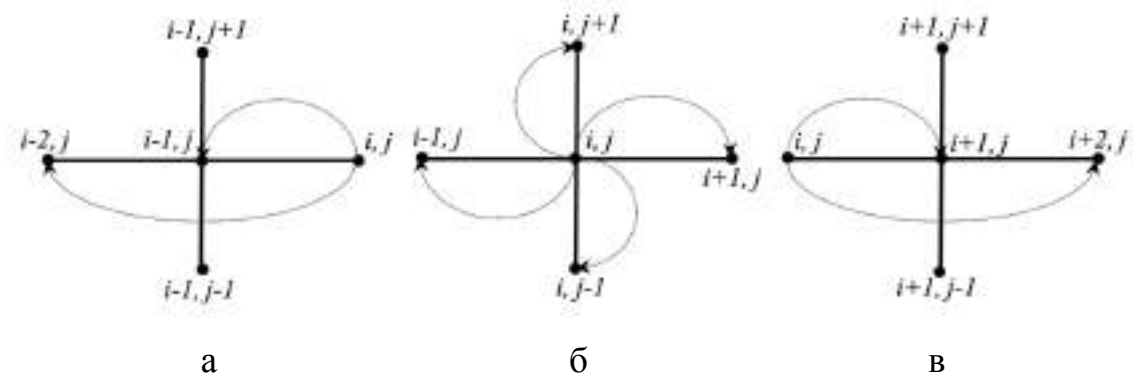


Рисунок 2.1 Схематичне відображення дискретизації потоку
а – правосторонні різниці; б – центральні різниці; в – лівосторонні різниці.

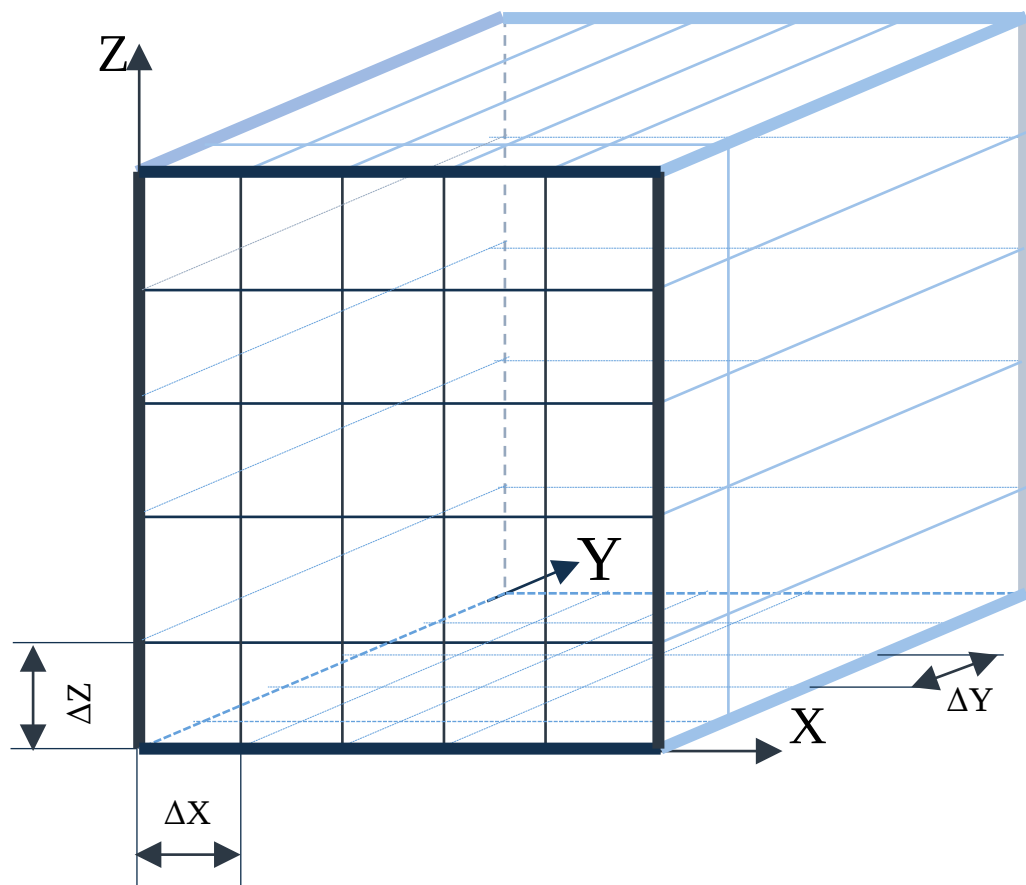


Рисунок 2.2 – Дискретизація розрахункової області (перший квадрант)

На прикладі вектора швидкості V формули для дискретизації всіх похідних, що входять в рівняння математичної моделі (2.10), (2.11) - (2.13) мають вигляд:

– центральні різниці [3]:

$$\frac{\partial V_{i,j,k}^n}{\partial X} = \frac{V_{i+1,j,k}^{n-1} - 4V_{i,j,k}^{n-1} + V_{i-1,j,k}^{n-1}}{(X_{i+1} - X_i) + (X_i - X_{i-1})} \quad (2.15)$$

$$\frac{\partial^2 V_{i,j,k}^n}{\partial X^2} = \frac{V_{i+1,j,k}^{n-1} - 2V_{i,j,k}^{n-1} + V_{i-1,j,k}^{n-1}}{(X_{i+1} - X_i) \cdot (X_i - X_{i-1})} \quad (2.16)$$

– лівосторонні різниці [3]:

$$\frac{\partial V_{i,j,k}^n}{\partial X} = \frac{3V_{i,j,k}^{n-1} - 4V_{i-1,j,k}^{n-1} + V_{i-2,j,k}^{n-1}}{(X_i - X_{i-1}) + (X_{i-1} - X_{i-2})} \quad (2.17)$$

$$\frac{\partial^2 V_{i,j,k}^n}{\partial X^2} = \frac{2V_{i,j,k}^{n-1} - 5V_{i-1,j,k}^{n-1} + 4V_{i-2,j,k}^{n-1} - V_{i-3,j,k}^{n-1}}{(X_i - X_{i-1}) \cdot (X_{i-1} - X_{i-2})} \quad (2.18)$$

– правосторонні різниці [3]:

$$\frac{\partial V_{i,j,k}^n}{\partial X} = \frac{-3V_{i,j,k}^{n-1} + 4V_{i+1,j,k}^{n-1} - V_{i+2,j,k}^{n-1}}{(X_{i+2} - X_{i+1}) + (X_{i+1} - X_i)} \quad (2.19)$$

$$\frac{\partial^2 V_{i,j,k}^n}{\partial X^2} = \frac{-V_{i+3,j,k}^{n-1} + 4V_{i+2,j,k}^{n-1} - 5V_{i+1,j,k}^{n-1} + 2V_{i,j,k}^{n-1}}{(X_{i+3} - X_{i+2}) \cdot (X_{i+2} - X_{i+1})} \quad (2.20)$$

– змішана похідна для запису конвективних складових [51]:

$$V_{i,j,k} \frac{\partial V_{i,j,k}}{\partial X} = \frac{1}{2} [3V_{i,j,k}^n - V_{i,j,k}^{n-1}] \cdot \frac{\partial V_{i,j,k}}{\partial X} \quad (2.21)$$

– нестационарний доданок [8]:

$$\left(\frac{\partial V_{i,j,k}}{\partial t} \right)^{n+1} = \frac{1}{\Delta t} \left(\frac{3}{2} V_{i,j,k}^{n+1} - 2V_{i,j,k}^n + \frac{1}{2} V_{i,j,k}^{n-1} \right) \quad (2.22)$$

Як приклад остаточного варіанту запису рівнянь математичної моделі (2.10), (2.11) - (2.13) в дискретної формі можна привести запис рівняння (2.10) і (2.12) центральними різницями. У першому випадку визначається величина швидкості потоку, а в другому концентрація інертних газів в вантажному трюмі танкера

$$\begin{aligned}
V_{i,j,k}^{n+1} = & \frac{1}{3} \frac{\Delta t}{\rho_{i,j,k}^{n+1}} (4V_{i,j,k}^n - V_{i,j,k}^{n-1}) + \\
& + \frac{2}{3} \frac{\Delta t}{\rho_{i,j,k}^{n+1}} \left[g \times \left(\frac{\rho_{i+1,j,k}^{n+1} - \rho_{i-1,j,k}^{n+1}}{(C_{i+1,j,k}^{n+1} - C_{i,j,k}^{n+1}) + (C_{i+1,j,k}^{n+1} - C_{i-1,j,k}^{n+1})} (C_{i,j,k}^{n+1} - C^A) - \right. \right. \\
& - \left. \frac{1}{3} \left(\frac{P_{i+1,j,k}^{n+1} - P_{i-1,j,k}^{n+1}}{(X_{i+1} - X_i) + (X_i - X_{i-1})} \right) \right] + \frac{2\Delta t}{3} \nu \left[\frac{Vx_{i+1,j,k}^n - 2Vx_{i,j,k}^n + Vx_{i-1,j,k}^n}{(X_{i+1} - X_i) + (X_i - X_{i-1})} + \right. \\
& + \left. \frac{Vx_{i,j+1,k}^n - 2Vx_{i,j,k}^n + Vx_{i,j-1,k}^n}{(Y_{j+1} - Y_j) + (Y_j - Y_{j-1})} + \frac{Vx_{i,j,k+1}^n - 2Vx_{i,j,k}^n + Vx_{i,j,k-1}^n}{(Z_{k+1} - Z_k) + (Z_k - Z_{k-1})} \right] \quad (2.23)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
C_{i,j,k}^{n+1} = & \frac{1}{3} \left[2\Delta t D \left(\frac{C_{i+1,j,k}^n - 2C_{i,j,k}^n + C_{i-1,j,k}^n}{(X_{i+1} - X_i)(X_i - X_{i-1})} + \right. \right. \\
& + \left. \frac{C_{i,j+1,k}^n - 2C_{i,j,k}^n + C_{i,j-1,k}^n}{(Y_{j+1} - Y_j)(Y_j - Y_{j-1})} + \frac{C_{i,j,k+1}^n - 2C_{i,j,k}^n + C_{i,j,k-1}^n}{(Z_{k+1} - Z_k)(Z_k - Z_{k-1})} \right) + 2\Delta t S + 4C_{i,j,k}^n - C_{i,j,k}^{n-1} \left. \right] \quad (2.24)
\end{aligned}$$

2.4. Розробка моделі обчислення аеродинамічних потокових даних

З урахуванням запропонованої класифікації було удосконалено модель обчислення АПД. Ця модель на відміну від існуючих основана на розробленій багаторівневій класифікації моделей руху потоку рідини або газу на основі гідродинамічних рівнянь для визначення концентрації інертних газів в трюмі під час інертизації. Це дозволило отримати інтегральні та локальні характеристики процесу інертизації трюмів танкеру для кількісного і якісного

аналізу АПД.

При моделюванні одну й ту саму течію можна відтворити з різним рівнем вирогідності отриманих результатів та з використанням різних методів візуалізації інформації картини течії, що відображається. Якість одержуваного двох або тривимірного поля течії в цьому випадку може сильно змінюватися [97], [118].

Згідно з результатами досліджень роботи [52]: «облік додаткових нестационарних збурень зазвичай викликає тільки збільшення часового інтервалу інтегрування рівнянь руху і не вимагає зменшення кроку сітки, тобто збільшення обсягу займаної оперативної пам'яті ЕОМ». У цьому контексті також слід враховувати, що при візуалізації АПД, які під час моделювання містять стаціонарні граничні умови (жорсткі стінки, незмінні характеристики потоку на вході і виході і т.п.) однозначне або збіжне рішення задачі можна отримати тільки в невеликому діапазоні зміни її характерних властивостей (швидкості і тиску) [3]. За межами кордонів такого діапазону розрахунковий блок програмного комплексу буде давати збій через нестійкий процес обчислення або його розбіжність взагалі [83].

При вирішенні рівнянь математичної моделі був використаний принцип створення чотиривимірних масивів початкових і кінцевих даних [38], [40]. У загальному випадку розмірність масиву повинна визначатися розмірністю задачі, яка вирішується. Найбільша розмірність масиву для відображення довільної характеристики рухомого потоку містить три просторові координати і четверту часову координату.

Запропоновану чотиривимірну модель обчислення АПД при інертизації трюмів (рис. 2.3) з загальною структурою масивів виду:

$$V_{i,j,k} \sim V[i=0..N, j=0..M, k=0..F, t=1..3],$$

де N , M , F – розмірність просторової сітки, яка визначається кількістю розрахункових вузлів в напрямку X (номер останнього вузла дорівнює N), Y (номер останнього вузла дорівнює M), Z (номер останнього вузла дорівнює F); t – тимчасовий рівень (максимальне значення $t = 3$).

При розщепленні вихідної системи робота програмного комплексу на кожному часовому розрахунковому шарі йде з одновимірними масивами. Не дивлячись на такий одновимірний інформаційний потік в силу другого порядку точності для вирішення основних диференціальних рівнянь гідродинаміки використовується три одновимірних масиву одночасно. Кожен з них відповідає своєму часовому рівню. Це видно на рисунку 2.3, де показана загальна структура використання масивів, яка дозволяє знизити до мінімуму ресурс пам'яті використовуваного програмного комплексу і ЕОМ під час процесу візуалізації гідродинамічних течій.

На рис. 2.3-а видно, що кожен одновимірний масив однозначно відповідає одному часовому прошарку, хоча в сукупності вони утворюють тривимірну структуру. Також, як видно на рис. 2.3-б тривимірна розмірність масиву по часу визначається обраним способом проведення розрахунку складників, що містять часовий параметр.

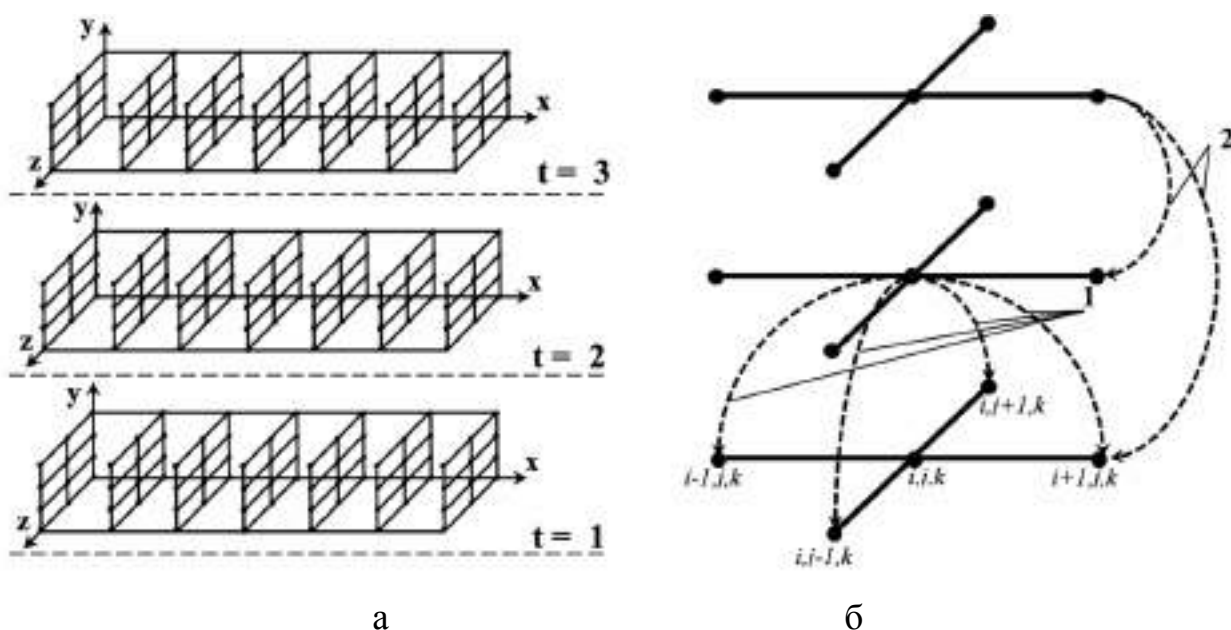


Рисунок 2.3 – Чотирьохвимірна модель обчислення АПД при інертизації трюмів (а – представлення АПД в чотирьохвимірному просторі; б – траєкторія обчислення одновимірних масивів).

При програмній реалізації запропонованої моделі АПД необхідно постійно здійснювати перевірку якості одержуваних результатів. Це можна робити з дотриманням двох умов [1], [3], [51].

Перша умова полягає в наступном - в кожному розрахунковому вузлі, який відповідає дискретної області модельованої течії, повинна витримуватися умова стійкості обчислювального процесу.

Критерієм такої стійкості є нерівність (2.31), який іноді називають числом Куранта або сітковим числом Рейнольдса [51]

$$\frac{2\nu\Delta t}{\Delta x^2} \leq 1 \quad (2.25)$$

де Δt – розрахунковий часовий крок (від 0,01 до 0,001), с. Δx – крок координат сітки в цьому напрямку, м.

Другою умовою є перевірка невідповідності знаку рівності в основних рівняннях руху. Така перевірка повинна здійснюватися в кожному розрахунковому вузлі і на кожному часовому рівні. Якщо максимальна величина розрахункового дисбалансу знаходиться на рівні менше $1 \cdot 10^{-6}$ то можна вважати, що модельований потік відтворюється з максимальним наближенням до реальної течії.

Реальний розподіл обох умов в поперечній площині течії було отримано під час реалізації інформаційної технології на прикладі вирішення конкретного завдання. У цій задачі була виконана візуалізація ізоліній струму і завихреності для АПД потоку всередині циліндричного трубопроводу. Усередині трубопроводу був встановлений диск. Його вісь симетрії збігалася з віссю симетрії труби. Результати та їх аналіз наведені нижче в розділі 4.

2.5. Висновки по розділу 2.

1. Запропоновано провести багаторівневу класифікацію існуючих моделей аеродинамічних потокових даних для отримання інтегральних та локальних характеристик процесу інертизації трюмів танкерів за рівнями обчислювальної складності відповідних рівнянь, які дозволяють моделювати АПД в просторово обмежених умовах трюмів.

2. Розроблено математичну модель ізотермічного руху на малих швидкостях багатофазного потоку з перенесенням маси, що дозволило для процесу інертизації танкеру отримати нові наукові дані щодо розподілу застійних зон та робочих характеристик рухомого потоку. Це забезпечило підвищення релевантності інформації для комп'ютерної підтримки рішень, що дає змогу забезпечити рішення ОПР (особі, що приймає рішення) щодо перебігу процесу та відсутності аварійних режимів на протязі роботи системи інертних газів.

3. Удосконалено модель обчислення АПД. Ця модель на відміну від існуючих основана на розробленій багаторівневій класифікації моделей руху потоку рідини або газу на основі гідродинамічних рівнянь для визначення концентрації інертних газів в трюмі під час інертизації. Це дозволило отримати інтегральні та локальні характеристики процесу інертизації трюмів танкеру для кількісного і якісного аналізу АПД.

РОЗДІЛ 3. МЕТОДИ ОБРОБКИ ПОТОКОВИХ АЕРОДИНАМІЧНИХ ДАНИХ ПРИ ІНЕРТИЗАЦІЇ ВАНТАЖНИХ ТРЮМІВ ТАНКЕРА

3.1. Метод розщеплення на підставі принципу Гюйгенса–Адамара

В попередньому розділі була розроблена чотирьохвимірна модель обчислення АПД. При практичному використанні цієї моделі встановлено, що проведення такого моделювання потребує значних затрат ресурсів оперативної пам'яті та процесора комп'ютера. З метою скорочення цих ресурсів розроблено метод моделювання процесу інертизації вантажних трюмів танкера з використанням методу розщеплення на підставі принципу Гюйгенса–Адамара [27], [63].

Головною передумовою цього методу є той факт, що початковий процес руху рідини або систему рівнянь, яка його описує можна розділити на сукупність більш простих процесів чи систем рівнянь. У більшості випадків найбільш обґрунтованим є проведення розщеплення по простору, у часі і по фізичним процесам. Наприклад, у випадку трьох вимірних простору одна початкова система рівнянь руху може бути розділена на сукупність трьох одномірних систем рівнянь. Кількість одержуваних таких одномірних систем завжди буде відповідати вихідній розмірності задачі [63]. З точки зору розробки інформаційних технологій такий розподіл призведе до значного спрощення алгоритму програмного блоку, що відповідає за вирішення рівнянь руху.

Основою методу розщеплення (дрібних кроків) є принцип Гюйгенса–Адамара. Стосовно до інформаційної технології візуалізації гідродинамічних процесів цей метод необхідно застосовувати для побудови візуалізаційного образу.

Якщо гідродинамічний процес описується системою диференціальних рівнянь і зміни його параметрів відбуваються у часі постійно (тобто час

змінюється у межах від 0 до T), то можливо припустити, що є функція V яка змінюється безупинним чином на проміжку часу від 0 до T . У цьому випадку можна записати, що для $0 \ll t_1 \leq t_2 \leq T$ буде виконуватись рівність:

$$V(t_2) = S(t_2, t_1) V(t_1), \quad (3.1)$$

де $S(t_2, t_1)$ – оператор переходу на часовому проміжку $[t_2, t_1]$.

Рівняння (3.1) повністю відповідає узагальненому принципу Гюйгенса–Адамара: послідовне рішення задачі Коші в проміжках $[t_0, t_1], [t_1, t_2], \dots, [t_{m-1}, t_m]$ еквівалентно рішенню задачі Коші в проміжку $[t_0, t_m]$. Згідно до такого формулювання розщеплена система буде складатися з рівнянь з операторами переходу, які мають наступні властивості:

$$\begin{aligned} S_\tau(t + \tau, t) = S_N\left(t + \tau, t + \frac{N-1}{N}\tau\right) \times S_{N-1}\left(t + \frac{N-1}{N}\tau, t + \frac{N-2}{N}\tau\right) \times \\ \times \dots \times S_1\left(t + \frac{\tau}{N}, t\right) \end{aligned} \quad (3.2)$$

де N – кількість розкладань, яка звичайно визначається розмірністю вихідної системи рівнянь.

Якщо вихідна система рівнянь має вигляд:

$$\frac{\partial V}{\partial t} = L_\tau V + f_\tau, \quad (3.3)$$

а продовжена система рівнянь записується як:

$$\frac{\overset{k}{\partial V}}{\partial t} = \overset{k}{L}_\tau \overset{k}{V} + \overset{k}{f}_\tau \quad (3.4)$$

то справедливе співвідношення, аналогічне властивості (3.4)

$$S_{\tau}^k(t + \tau, t) = S_N^k\left(t + \tau, t + \frac{N-1}{N}\tau\right) \times S_{N-1}^k\left(t + \frac{N-1}{N}\tau, t + \frac{N-2}{N}\tau\right) \times \dots \times S_1^k\left(t + \frac{\tau}{N}, t\right) \quad (3.5)$$

Під терміном продовженої системи (3.4), яка фактично представляє собою розщеплену систему, мається на увазі система рівнянь, що записана за допомогою оператора, отриманого диференціюванням вихідних рівнянь.

Можливо стверджувати, що операції продовження і факторизації є перестановочними. Продовженій системі відповідає і продовжена задача [63], [117].

Для подальшого використання методу розщеплення в інформаційних технологіях під час побудови образів візуалізації розподілу гідромеханічних параметрів важливе значення має теорема збіжності. Її формулювання таке: якщо факторизована вихідна і перша продовжена системи коректні і рішення вихідної системи досить гладке, то воно єдине і до нього сходиться рішення факторизованої системи.

Розгляд теореми у застосуванні до побудови візуалізації розподілу характерного гідромеханічного параметру, або під час виділення у просторі характерної ізолінії руху частинок, що складають потік, показує, що:

- якщо під час візуалізації вхідні потокові данні отримані шляхом стійкого чисельного моделювання і відповідають коректному вирішенню системи диференціальних рівнянь руху то образ візуалізації буде однозначним та коректним [57];
- збіжність картини візуалізації, що відображається до реального образу гідродинамічного процесу буде відповідати похибці математичного блоку, який задіяно у програмному комплексі використаного методу інформаційної технології (Додаток С).

При розгляді систем рівнянь руху (2.10) - (2.13), які записані вище видно, що вони в такій формі запису не можуть бути вирішені. Це викликано тим, що всі системи є перевизначеними оскільки кількість рівнянь менше числа

невідомих. Для трьох складових швидкості і тиску скрізь присутній тільки три рівняння. З цієї причини в кожен з цих систем необхідно ввести додаткове замикаюче четверте рівняння.

Найчастіше в літературі з гідродинаміки пропонується використовувати рівняння нерозривності [33]. У тензорній або повній формі запису воно має вигляд

$$\operatorname{div} \bar{V} = 0 \quad \text{або} \quad \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0. \quad (3.6)$$

В силу своєї простоти і обґрунтованого фізичного трактування такий спосіб замикання рівнянь є коректним.

З точки зору інформаційних технологій використання рівняння (3.6) є скрутним. Його не можна використовувати в методі розщеплення, оскільки в цьому випадку буде порушуватися основна умова - вимога до нерозривності потоку. З цієї причини для створення програмного комплексу перспективним є використання трансформованого рівняння для тиску. Його можна сформулювати у формі запису, яку називають рівнянням типу Пуассона. Воно має вигляд [56]

$$\begin{aligned} & \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial z^2} = \\ & = 2\rho \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} \frac{\partial v_y}{\partial y} - \frac{\partial v_y}{\partial x} \frac{\partial v_x}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial y} \frac{\partial v_z}{\partial z} - \frac{\partial v_z}{\partial y} \frac{\partial v_y}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \frac{\partial v_x}{\partial x} - \frac{\partial v_x}{\partial z} \frac{\partial v_z}{\partial x} \right) \end{aligned} \quad (3.7)$$

Головною перевагою рівняння (3.7) у порівнянні з рівнянням (3.6) є значно простий спосіб визначення на програмному рівні остаточного значення тиску в потоці, що моделюється при отриманні АПД [54].

3.2. Метод обчислення поточкових даних на основі запропонованої чотирьохвимірної моделі

Загальна схема інформаційних потоків при прийнятті рішень в ході процесу інертизації на танкері відображена на рисунку 3.1, де видно, що в якості основного інформаційного потоку при роботі системи інертних газів танкера використовувалися як результати моделювання та статистичні дані так і дані, які одержані з контрольно-вимірювальних прилади і апаратури. Тобто повинні використовуватися як поточкові, так і статичні дані.



Рисунок 3.1 – Схема інформаційних потоків при прийнятті рішень в ході процесу інертизації на танкері

Тобто в якості поточкових даних можуть бути використані як результати моделювання процесу, так і результати вимірювання засобів вимірювання за рахунок передачі по HART протоколу. У загальному випадку всі поточкові дані, які використовувалися в ході роботи розробленої інформаційної технології на танкері відповідали наступним трьом характеристикам процесу. До них належали: поточне значення концентрації кисню всередині трюму; поточне значення температури усередині трюму, гідростатичний тиск всередині трюму.

Для побудови образів візуалізації під час роботи системи вентиляції вантажних трюмів танкера були сформульовані два основних положення. До цих положень відносяться:

1. Під час візуалізації поля течії необхідно виконувати структурування потоку за випадковим збігом двох і більше характеристичних параметрів. Як приклад подібного структурування можна привести умову, яке відображає збіг ізоліній градієнта концентрації з ізобарами. Вона записується у вигляді

$$\langle \nabla C_{i,j,k_{O_2}} \rangle = \langle P_{i,j,k} \rangle = idem \quad (4.1)$$

2. Для економії програмних і обчислювальних ресурсів інформаційний потік, створюваний програмним комплексом і інформаційний потік від вимірювального обладнання всередині вантажного трюму, повинні піддаватися обробці і порівняльного аналізу тільки на кінцевій стадії процесу вентиляції.

Як показник, відповідного наступу кінцевої стадії процесу інертизації танкера може бути рекомендовано використання величини концентрації кисню у вихідному перерізі трюму. Чисельним кордоном настання останньої фази - кінцевої стадії процесу інертизації може бути величина діапазону розбіжності зі стандартним нормативним показником. Її чисельне значення має завжди перебувати в діапазоні від 5 до 7 % або задовольняти нерівності

$$C_{i,j,K_{O_2}} < K_n \left(C_{i,j,K_{O_2}} \right)_{\text{норм}} \quad (4.2)$$

де K_n – поправочний коефіцієнт для встановлення меж ($K_n=0,93-0,95$).

Використання інтегральних характеристик потоку в сукупності з результатами вимірювань для подальшого прийняття рішення про зупинку процесу вентиляції вантажних трюмів танкера необхідно виконувати в тому випадку, коли:

- кінцеві значення концентрації кисню у вихідному перерізі трюму відрізняються від нормативних на величину менше 2 %;
- потокова похибка результатів порівняння поточних значень з бази даних і результатів вимірювань відповідає значенням менш 3 %.

Елементи відображення в використаній інформаційній технології були отримані в ході дискретизації тобто за рахунок відображення координат у вигляді кінцевої множини звітів [17] окремих точок. Кожна точка відповідала розрахунковому вузлу використовуваного модуля моделювання. Множина всіх точок, тобто фактично елементи масивів кінцевих даних процесу, піддавалася сегментації. В цьому випадку область трюму поділялася на три частини:

- гранична область (простір, що прилягає до стінок трюму) поблизу вертикальних стінок трюму і його дна;
- внутрішня область (весь внутрішній простір трюму);
- верхня область (простір, що прилягає до верхньої стінці трюму з областю виходу повітря в навколишній простір).

На цьому рівні здійснювалася кластеризація результатів за умовою ідентичності параметра в двох і більше сусідніх точках. Перехід від кластера до кластеру проводився за рахунок використання операції усереднення параметра, що оброблюється на даному часовому рівні або в конкретно взятому перетині або обсязі.

В кінцевому підсумку кожна робоча характеристика суміші повітря з інертними газами всередині трюму після операції кластеризації могла оброблятися і в подальшому візуалізуватися в якості локального або інтегрального параметра. Всі дані, які отримуються в ході сегментації можуть

бути використані для побудови ізоліній, що відображають просторовий характер розподілу потрібного параметра. Так, наприклад, розподіл концентрації кисню в певній і довільно обраній площині трюму може бути отриманий за рахунок використання сегментації. Приклад такої обробки інформаційного потоку показаний на рисунку 3.2. На ньому відображені дані про характер розподілу величини розрахункової концентрації кисню всередині трюму (в поперечному перерізі, розташованому на відстані, відповідному 90 % висоти трюму) в різні моменти часу.

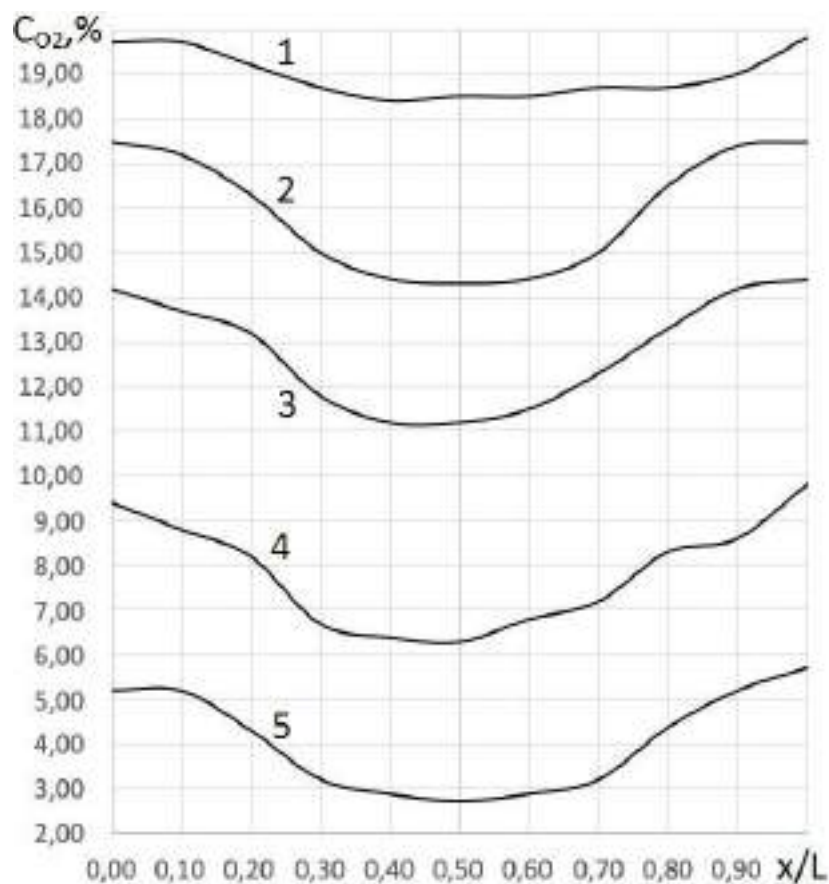


Рисунок 3.2 – Характер зміни в часі розподілу концентрації кисню всередині трюму (середній перетин)

1 - початок процесу; 2 - період роботи 4 години; 3 - період роботи 10 годин; 4 - період роботи 18 годин; 5 - закінчення процесу (22 години).

– прийняття рішення щодо процесу інертизації.

Результати, отримані в ході кластеризації, можуть бути використані для відображення застійних зон в рухомому потоці або виділення характерних меж області, де витіснення повітря відбувається найінтенсивніше.

3.3. Розробка методу підтримки прийняття рішень при інертизації вантажних трюмів танкера

На основі запропонованих багаторівневої класифікації гідродинамічних рівнянь, чотирьовимірної моделі відтворення АПД та методу їх розщеплення за принципом Гюйгенса–Адамара при моделюванні розроблено метод підтримки прийняття рішень при інертизації вантажних трюмів танкерів. Він відображений на рисунку 3.3 і сам метод передбачає виконання наступних кроків:

- формулювання завдань процесу інертизації, щодо кінцевих значень концентрації кисню та напірно-витратних характеристик подання газів до вантажного трюму танкеру;
- визначення потужності обчислювальної техніки, що використовується на судні і вибір відпопідно до неї рівня складності моделі відтворення АПД згідно з запропонованою багаторівневою класифікацією;
- завдання початкових і граничних умов для відтворення АПД, що базуються на технічних даних системи інертизації на конкретному танкері та умові не протікання не жорстких поверхонь;
- проведення моделювання для обчислення АПД та при необхідності збереження результатів моделювання в СУБД;
- одержання даних від засобів вимірювання тиску, витрати, концентрації і температури з використанням суднової мережі їх обробки;
- порівняння інформації, яка одержана на підставі моделювання АПД з визначенням рівням складності та вимірювання;

Під час реалізації методу підтримки прийняття рішень при інертизації вантажних трюмів танкерів основними джерелами отримання інформації в комплексі є дані від суднових засобів вимірювання, дані зі сховища основних модулів процесу моніторингу та моделювання попередніх аналогічних технологічних процесів із СУБД, дані з сформованих користувачем масивів вихідних величин, які необхідно використовувати в інформаційній технології для комп'ютерної підтримки рішень (ІТ КІР) при моніторингу технологічних процесів в трюмах танкера. Також передбачається використання стандартних бібліотек і баз даних, побудованих на принципі модульної системи.



Рисунок 3.3 – Схема реалізації методу підтримки прийняття рішень при інертизації вантажних трюмів танкерів

У момент формування початкових АПД ІТ КІР одночасно з початком реального процесу інертизації трюмів здійснює процесінг візуалізованої інформації. Цей процес є ітераційним. При необхідності в будь-який момент

часу він передбачає проведення коригування процесу моделювання з боку користувача.

В якості інформації для прийняття рішень можуть бути використані як результати моделювання процесу, так і результати вимірювання засобів вимірювання за рахунок передачі по HART протоколу. У загальному випадку ІТ КІР враховує наступні характеристики технологічного процесу: поточне значення концентрації кисню всередині трюму; поточне значення температури усередині трюму, гідростатичний тиск всередині трюму.

3.4. Висновки по розділу 3

1. Отримав подальший розвиток метод обчислення потокових даних на основі запропонованої їх чотирьохвимірної моделі, який полягає в розщепленні багатовимірного процесу на послідовність одновимірних, на підставі узагальненого принципу Гюйгенса–Адамара. Головною передумовою цього методу є той факт, що початковий процес руху рідини та систему рівнянь, що його описує можна розділити на сукупність більш простих процесів та систем рівнянь. Цей метод дозволив значно скоротити час моделювання процесу інертизації судна та забезпечити візуалізацію релевантної інформації для прийняття рішень щодо підготовки вантажних операцій на танкерах.

2. Запропоновано метод підтримки прийняття рішень при інертизації вантажних трюмів танкерів, який базується на використанні розробленої класифікації рівнів обчислювальної складності, удосконаленої моделі обчислення аеродинамічних потокових даних та методі їх обчислення, що дозволяє розробити інформаційну технологію для комп'ютерної підтримки рішень та дає можливість значно скоротити технологічний час процесу інертизації.

Основними джерелами отримання інформації для комп'ютерної підтримки рішень є потокові дані від суднових засобів вимірювання, потокові дані зі сховища основних модулів процесу моніторингу та моделювання попередніх аналогічних технологічних процесів, потокові дані з формованих користувачем масивів вихідних величин, які необхідно використовувати в програмному забезпеченні при моніторингу процесу інертизації вантажних трюмів танкера. Також передбачається використання стандартних бібліотек і баз даних, побудованих на принципі модульної системи.

.

РОЗДІЛ 4. РОЗРОБКА ТА ВПРОВАДЖЕННЯ ІНФОРМАЦІЙНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ В СУДНОВОМУ ТЕХНОЛОГІЧНОМУ ПРОЦЕСІ

4.1 Комп'ютерна підтримка рішень в інформаційних системах підготовки вантажних операцій на танкерах

Використання розробленої інформаційної технології базуються на її застосуванні на реальних судах в комбінації зі штатними засобами вимірювання і контролю. З цієї причини на рівні програмного забезпечення завжди необхідно використовувати їх показання.

При роботі суднової системи інертних газів основними параметрами процесу інертизації, які піддаються постійному контролю є:

- концентрація кисню в потоці повітря і димових газів на виході з вантажного трюму;
- температура повітря і димових газів всередині вантажного трюму;
- температура потоку повітря і димових газів на виході з вантажного трюму;
- витрата димових газів.

Для забезпечення безпечної мікроатмосфери всередині вантажного трюму на танкері, підвищення надійності його експлуатації, зниження аварійності і підвищення рентабельності перераховані вище чотири параметри повинні контролюватися в автоматичному режимі [29]. В даний час це можливо виконати з використанням широкого набору приладів, первинних датчиків вимірювання і контролерів. У комбінації з розробленою інформаційною технологією вони можуть забезпечити отримання головного результату - скорочення часу інертизації танкера.

Комбінація розробленої інформаційної технології з системою автоматизованого управління може забезпечити скорочення часу процесу за

рахунок використання замкненої мережі. Як це видно на рисунку 4.1 в якості основних елементів до цієї мережі належать:

- самоналагоджувальна бездротова мережа, яка складається з промислових (суднове виконання компанією Emerson, США) датчиків температури (термопари), вимірників концентрації і манометрів;
- бездротовий шлюз;
- контролери;
- інформаційна технологія;
- судновий керуючий комп'ютер.

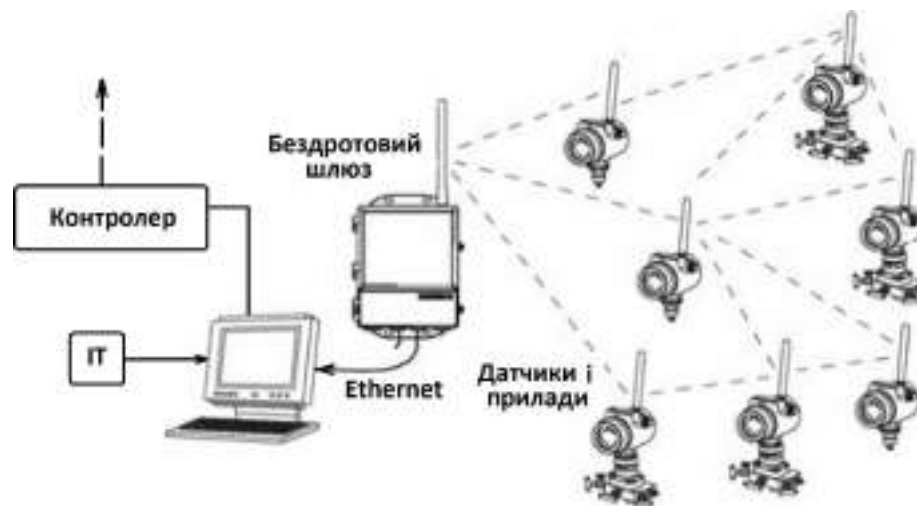


Рисунок 4.1 – Схема суднової мережі роботи приладів вимірювання

За винятком програмного забезпечення, яке відноситься до інформаційної технології все вищеперелічене обладнання на судні комбінується в єдину мережу за рахунок відповідного заводського (Emerson, США) програмного забезпечення, а також системи управління і контролю. Розроблене програмне забезпечення для візуалізації процесу інертизації вантажних трюмів танкера заводським програмним комплексом встановлюється на єдиний керуючий судновий комп'ютер.

Робота наведеної на рисунку 4.1 замкнутої мережі базується на виконанні наступних операцій:

- початкову перевірку і самостійне налаштування всіх елементів системи вимірювання;
- контроль поточної концентрації кисню в трюмі;
- контроль поточної температури в трюмі;
- управління механізмами для відкриття або закриття вентиляційного клапана на виході з трюму;
- аварійне управління витратно-напірними характеристиками системи подачі інертних газів в трюм судна;
- візуалізацію процесу заповнення трюму інертним газом;
- індикацію ступеня виконання процесу.

Всі первинні датчики вимірювання, тиску і витрати, а також газоаналізатор і контролери системи управління працюють з використанням промислового мережевого стандарту SmartWireless. Для передачі даних вони підтримують протокол HART.

У разі вимірювання температури використовуються провідні термопари, які укомплектовані для сполучення з бездротовою мережею перетворювачем компанії Emerson - SmartWireless THUM Adapter [99].

У комбінації з розробленою інформаційною технологією технологія Wireless-HART є достатньо надійною. Вона забезпечує сумісність з усіма відомими HART-пристроями і системами в будь-яких виробничих умовах.

Сумісність реалізується навіть при наявності великої кількості джерел радіо або електромагнітних перешкод. Це відбувається за рахунок того, що надійність передачі даних забезпечується стійкістю наскрізною передачею результатів вимірювання на рівні не менше 99,99 %. Wireless-HART технологія може бути реалізована на будь-якому танкері незалежно від його розмірів і конструкції.

Підключення суднового керуючого комп'ютера до мережі Wireless-HART також здійснюється по бездротовому шлюзу, який виконує самостійне налаштування і безперервний опит всіх вимірювальних датчиків при інертизації танкера.

Вся потоковая інформація між шлюзом і судновим керуючим комп'ютером проходить з використанням протоколу TCP/IP по мережі Ethernet [74]. Бездротові датчики утворюють самоналаштовувальну сенсорну мережу. Її структурна схема показана на рисунку 4.2. На ньому видно, що управління встановленим на вантажному танку механізмом автоматичного відкриття або закриття випускного люка здійснюється за допомогою контролера. Цей пристрій може бути погоджено з судновим керуючим комп'ютером і вимірювальними вузлами за допомогою двох з'єднань - дротового і бездротового.

Алгоритм, що керує роботою системи керування процесом інертизації трюмів танкера включає до себе наступні операції:

- постійне опитування всіх елементів системи з метою перевірки їх



Рисунок 4.2 – Структурна схема бездротової мережі

працездатності та єдиної комунікації при роботі в бездротовій сенсорній мережі Ethernet;

- судновий керуючий комп'ютер при роботі заводського програмного забезпечення за допомогою передачі сигналу через бездротовий шлюз запитує стан вимірювальних приладів - газоаналізатора, термометра і манометра;

- перевірку стану концентрації кисню всередині трюму і порівняння показання з нормативним параметром;
- перевірку величини температури потоку всередині і на виході з вантажного трюму і порівняння показання з нормативним параметром;
- порівняльний аналіз значень температури, тиску і концентрації кисню всередині трюму, отриманих в ході роботи бездротової мережі і за рахунок роботи інформаційної технології;
- індикацію відхилень робочих характеристик процесу від їх нормативних значень;
- візуалізацію розподілу поточних значень робочих характеристик процесу;
- при порівнянні концентрації кисню на виході з трюму з нормативним (або нижчим) значенням судновий керуючий комп'ютер передає контролеру сигнал на закриття електромагнітним клапаном вантажного трюму;
- програмне забезпечення інформаційної технології передає сигнал на керуючу програму про необхідність індикації закінчення процесу і формуванні файлу зі звітом [100];
- користувач керуючої програми або сама керуюча програма в разі отримання по бездротової сенсорної мережі Ethernet даних про аварійні значення робочих параметрів процесу інретизації трюму роблять регулювання напірно-витратними характеристиками системи подачі інертних газів [101];
- програмне забезпечення інформаційної технології здійснює візуалізацію на судовому керуючому комп'ютері поточних значень всіх робочих параметрів процесу інертизації трюму.

Архітектура розробленого програмного забезпечення для його роботи під час інретизації вантажних трюмів танкера враховує використання дерева моделі зі стандартною деревовидною структурою. Її побудова заснована на використанні всіх доступних образів візуалізації без використання закладок [82]. Ця побудова є стандартною для використання на судні з будь-якою

геометрією робочого простору трюму. Архітектура програмного комплексу у вигляді дерева моделі показана на рисунку 4.3.

Алгоритм формування користувальницької і програмної (часової) баз даних з масивами координат розрахункових вузлів показаний на рисунку 4.4. На наведеній блок-схемі видно, що в результаті циклічних операцій виконується прямий розрахунок необхідних масивів чисельних даних. Для простоти аналізу на рис. 4.4 наведені позначення координат, що відповідають рівномірній розрахунковій сітці з одиничним кроком за трьома напрямками (див. Рис. 2.2). Одночасно, по закінченню зовнішнього циклу, проводиться формування:

- тимчасової бази даних координат для поточного моніторингу робочого процесу;
- бази даних координат для використання в аналогічних операціях в майбутньому або на суднах аналогічних конструкцій.

Виняток розрахункового модуля в разі збігу всіх вихідних параметрів і характеристик навколишнього середовища (відносної вологості, щільності, температури і т.і.) в процесі інертизації трюму дозволяє знизити вимоги до потужності ЕОМ використовуваних при роботі програмного забезпечення.

На рисунку 4.5 показан приклад вікна виведення результатів процесу інертизації вантажних трюмів танкера. Вікно відображає роботу спеціалізованого програмного забезпечення, яке було розроблено для використання інформаційної технології при візуалізації потокових даних під час роботи суднової системи інертних газів на танкері. Як видно, всі результати відносяться до концентрації кисню всередині трюму і наочно показують користувачеві, що:

- обсяг заповнення трюму інертними газами завершено тільки на 92%;
- поточне значення концентрації кисню всередині трюму газоаналізатором відображається не точно, оскільки інтегральна оцінка розподілу кисню у всьому обсязі трюму отримана на основі інформаційної технології менше ніж свідчення отримані по бездротовій мережі (5,43 % < 7 %);

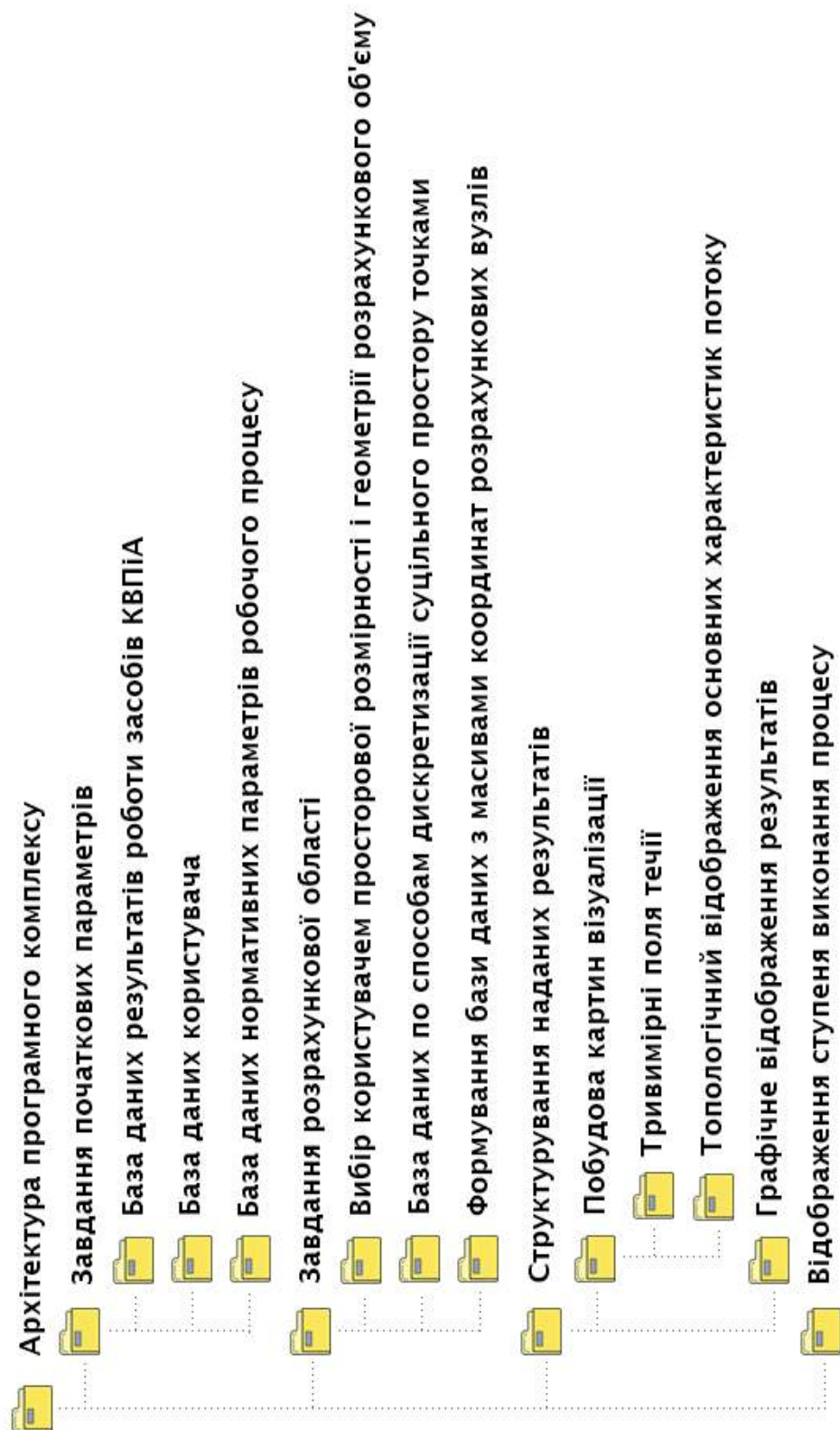


Рис. 4.3 – Архітектура програмного комплексу

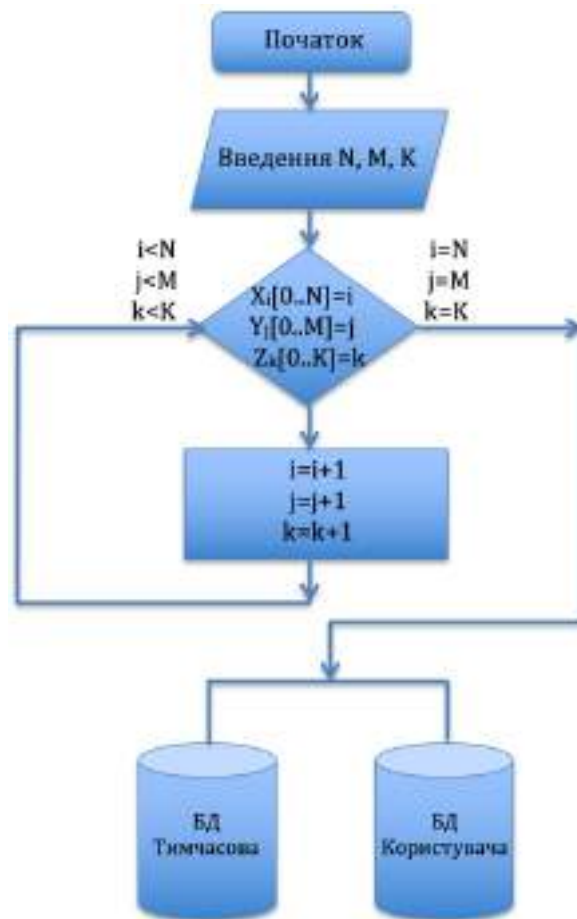


Рис. 4.4 – Алгоритм формування баз даних координат

- прогнозований і поточний час процесу збігаються, що свідчить про відсутність аварійних режимів на протязі всієї роботи системи інертних газів.

Інформаційні технології доцільно застосовувати при проведенні на танкерах операції видалення повітря з трюмів за допомогою введення в них димових газів. Детальний опис цього процесу було розглянуто в розділах 1.2 і 2.2. Для цього процесу під час досліджень було розроблено програмний комплекс [41]. Його загальна структура показана на рисунку 4.6.

Користувач при роботі з програмним забезпеченням отримує інформацію з декількох основних джерел. Першим, найголовнішим джерелом є вимірювання, здійснюваними судновими засобами КВПіА [116]. До них відносяться - витратоміри, датчики температури і газоаналізатор, який

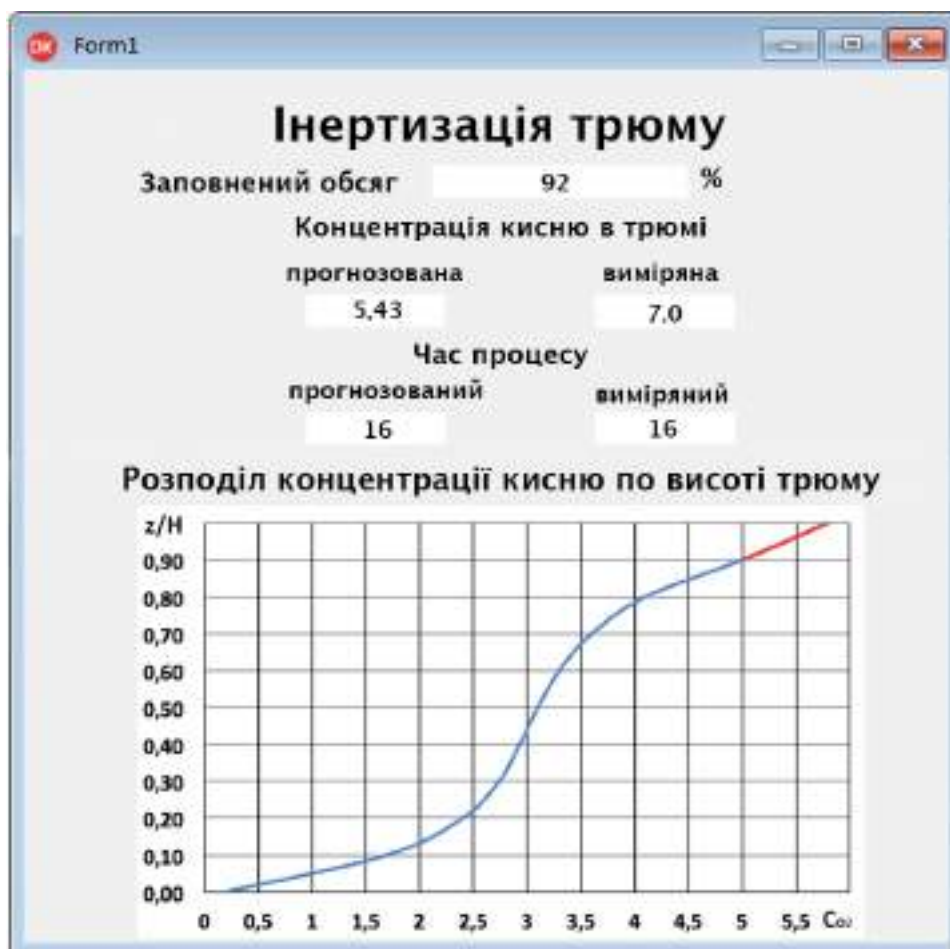


Рисунок 4.5 – Оболонка призначеного для користувача вікна виведення результатів програмного комплексу для інертизації танкера

використовується в якості вимірювача концентрації кисню.

Другим джерелом є сховище основних модулів для проведення процесу моніторингу та моделювання на підставі інформації, яка була отримана, оброблена і збережена в попередніх технологічних процесах. При використанні сховища даних також передбачається використання стандартних бібліотек, побудованих на принципі модульної системи. Всі без винятку бібліотеки призначені для:

- моделювання розрахункового простору, який відтворює трюм судна на самому початковому етапі запуску робочого процесу;

- візуалізації всіх поточних і інтегральних характеристик процесу наповнення трюму димовими газами.

Третім джерелом є сформовані користувачем масиви вихідних величин, які необхідно використовувати при моніторингу процесу вентиляції вантажних трюмів танкера. До таких величин відносять всі геометричні розміри вантажного трюму (габаритні лінійні розміри, лінійні розміри жорстких поверхонь стін і кути їх нахилу для нестандартних форм корпусу трюму і т.п.), фізичні константи процесу, а також параметри навколишнього середовища.

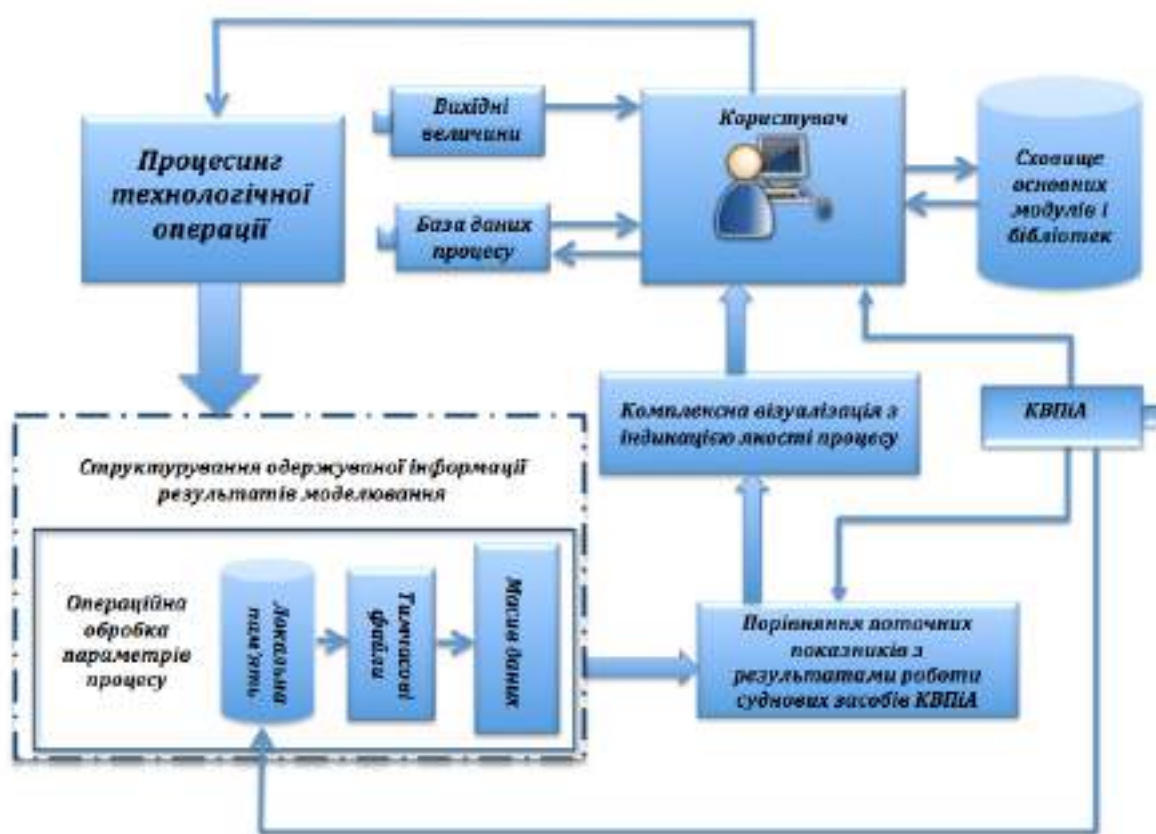


Рис. 4.6 – Структура програмного забезпечення для відтворення процесу інертизації вантажних трюмів на танкерах

В ході роботи програмного забезпечення передбачається постійне використання інформаційного потоку від бази даних, яка містить чисельні значення поточних параметрів і всі необхідні розрахункові константи.

До розрахункових констант відносяться: обмежувачі розмірності масивів, перелік критеріїв збіжності обчислювального процесу, похибки для порівняння результатів моделювання технологічного процесу вентиляції з чисельними динними інформаційних потоків від використовуваних на судні засобів КВПіА тощо.

З точки зору створення та використання універсального програмного продукту важливим є використання мінімальних розмірностей використовуваних масивів чисельних даних [61]. З цієї причини при проведенні процесу візуалізації в цій базі даних необхідно використовувати вираз для визначення щільності димових газів.

Для конкретних видів палива щільність димових газів наводиться у вигляді довідкових даних. З точки зору інформаційних технологій не дивлячись на внесення незначною похибки цей параметр зручніше використовувати у вигляді універсальної формули виду [18]

$$\rho_{д.г} = \frac{1 + \alpha \left(\frac{Q_T}{0,21} \right)}{22,4(m_{CO_2} + m_{H_2O} + m_{NO_2} + m_{O_2})} \frac{273}{273 + T} \quad (4.1)$$

де: $\rho_{д.г.}$ – щільність димових газів, $кг/м^3$; T – температура, $^{\circ}C$; α – коефіцієнт надлишку повітря; Q_T – теоретична кількість кисню, необхідна для згоряння 1 кг палива, $кг/кг$; m_i – мольное зміст i -ої компоненти інертних газів (розраховується за емпіричними формулами [58]), $м^3$;

У момент формування початкового потоку даних програмне забезпечення одночасно з початком реального процесу інертизації трюмів здійснює процесинг інформації, що візуалізується. Цей процес є циклічним. При необхідності в будь-який момент часу він передбачає проведення коригування процесу моделювання з боку користувача.

Структурування інформаційного потоку ґрунтується на постійній операційної обробці поточних параметрів процесу інертизації вантажного трюму танкера. Всі інформаційні потоки з отриманими значеннями результатів

модельовання і виконаних вимірювань надходять в локальне сховище [70]. Після цього формується набір тимчасових файлів, які містять всю необхідну для користувача інформацію для трьох моментів часу - поточного і двох попередніх. На підставі обробки цих тимчасових файлів в кожен момент часу формується відповідний масив чисельних даних. Такі масиви містять конкретні значення кожного відтвореного при візуалізації параметра (концентрації кисню, тиску, температури, швидкості і т.п.). При необхідності на запит користувача вони можуть бути візуалізовані в будь-який момент часу у відповідному діалоговому вікні.

Після формування масивів даних все значення технологічно важливих параметрів автоматично порівнюються з аналогічними результатами їх вимірювань за допомогою суднових засобів КВПіА. У разі їх збігу між собою в межах заздалегідь заданої похибки відбувається перехід на рівень їх візуалізації. Максимальне значення похибки не повинно перевищувати 3 %.

Візуалізація на екрані користувача, приклад якої показаний на рисунку 4.7, передбачає обов'язкове відображення чотирьох індикаторів:

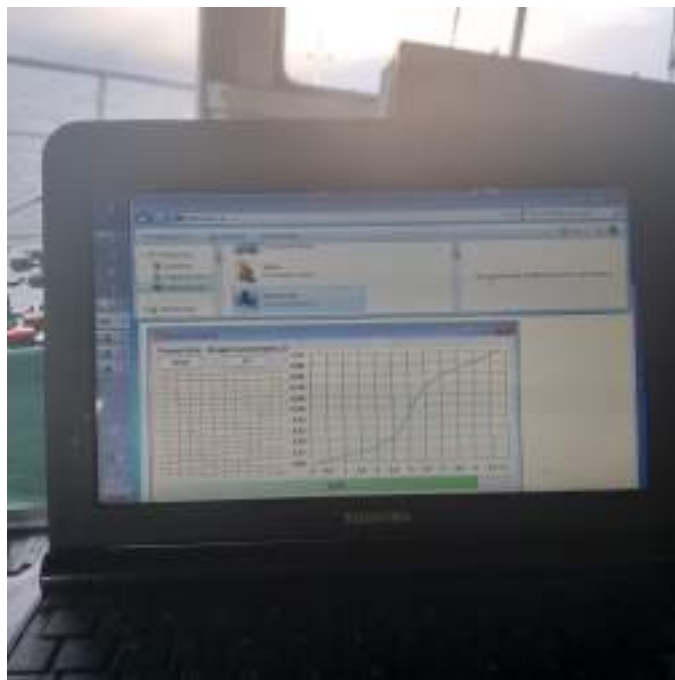


Рис. 4.7 – Відображення інформації про процес вентиляції вантажного трюму танкера

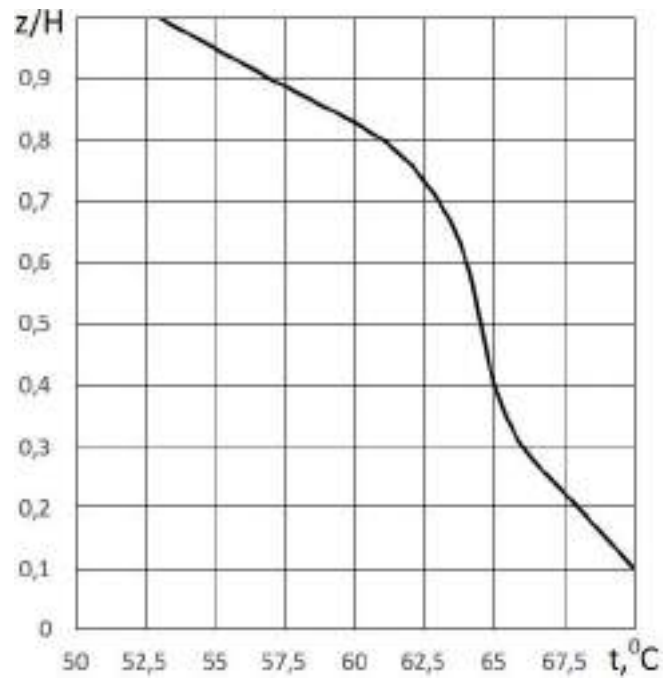
- часу який пройшов з початку моменту вентиляції вантажного трюму танкера;
- ступеня виконання процесу у відсотках;
- графіка, що демонструє рівень падіння концентрації кисню в обсязі трюму при його вентиляції;
- графіка, що відображає чисельні значення розподілу концентрації кисню всередині трюму, отримані шляхом вимірювання та моделювання.

Якщо користувачем на початковому етапі був обраний рівень візуалізації, який передбачає опціональну побудову поля концентрації кисню або поля температури то в окремому вікні ці величини будуть відображатися для всієї вертикальній площині поперечного перерізу трюму у вигляді графіка, що представляє собою набір відповідних ліній. Приклад такої графічної візуалізації процесу інертизації показаний на рисунку 4.8.

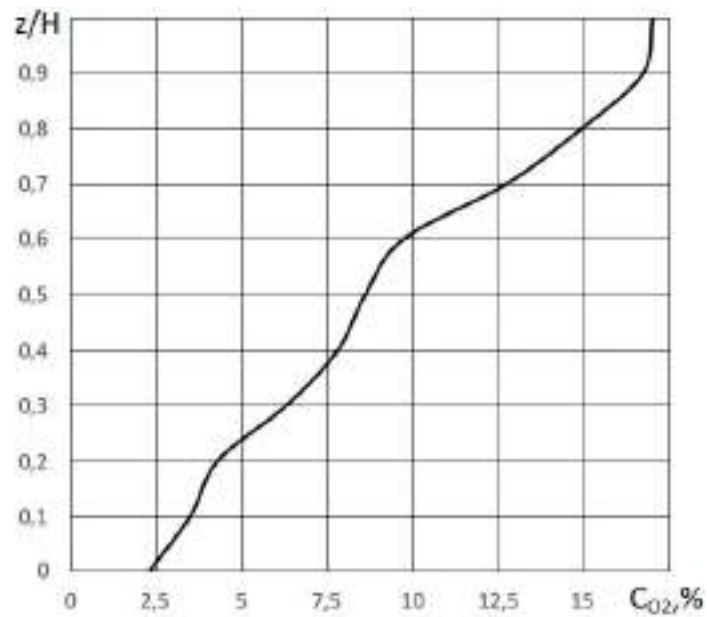
На рівні процесингу технологічної операції передбачається внесення коригувань користувачем. У результаті розрахунку в якості масивів вихідних даних (значення швидкості, концентрації кисню і т.п.) можуть направлятися інформаційні потоки від засобів КВПіА. Таке коригування на танкері характеризується дуже невисоким ступенем ймовірності. Її необхідно виконувати в тому випадку, якщо параметри реального процесу "кількісно випереджають" результати моделювання. Ця опція в програмному комплексі відповідає випадку, коли падіння концентрації кисню в трюмі настає раніше, ніж це передбачається відповідними значеннями результатів роботи програмного комплексу. Такими результатами може бути моделювання та порівняння зі значеннями основних параметрів які зберігаються в базі даних процесу.

порівняння зі значеннями основних параметрів які зберігаються в базі даних процесу.

До головних особливостей інформаційної обробки процесу вентиляції в умовах роботи судна відноситься нерівномірність розподілу характерних параметрів по ширині і висоті вантажного трюму [50].



а



б

Рис. 4.8 – Графічний контроль розподілу середньої температури і середньої концентрації кисню по висоті трюму
 а – розподіл температури;
 б – розподіл концентрації кисню.

На стадії величини ступеня виконання процесу, що перевищує значення рівних 50 % така нерівномірність повинна коректуватися. Це виконується за

рахунок використання інтегральних характеристик процесу. Їх можна отримувати в будь-який момент часу шляхом використання циклічного процесу статистичної обробки масивів даних із локального сховища даних з рівня структурування інформації.

Відповідно до приведених прикладів візуалізаційної обробки АПД під час вентиляції вантажних трюмів танкера було сформульовано загальний сценарій формування дерева прийняття рішень [55]. Загальна структура такого сценарію показана на схематичному рисунку 4.9.

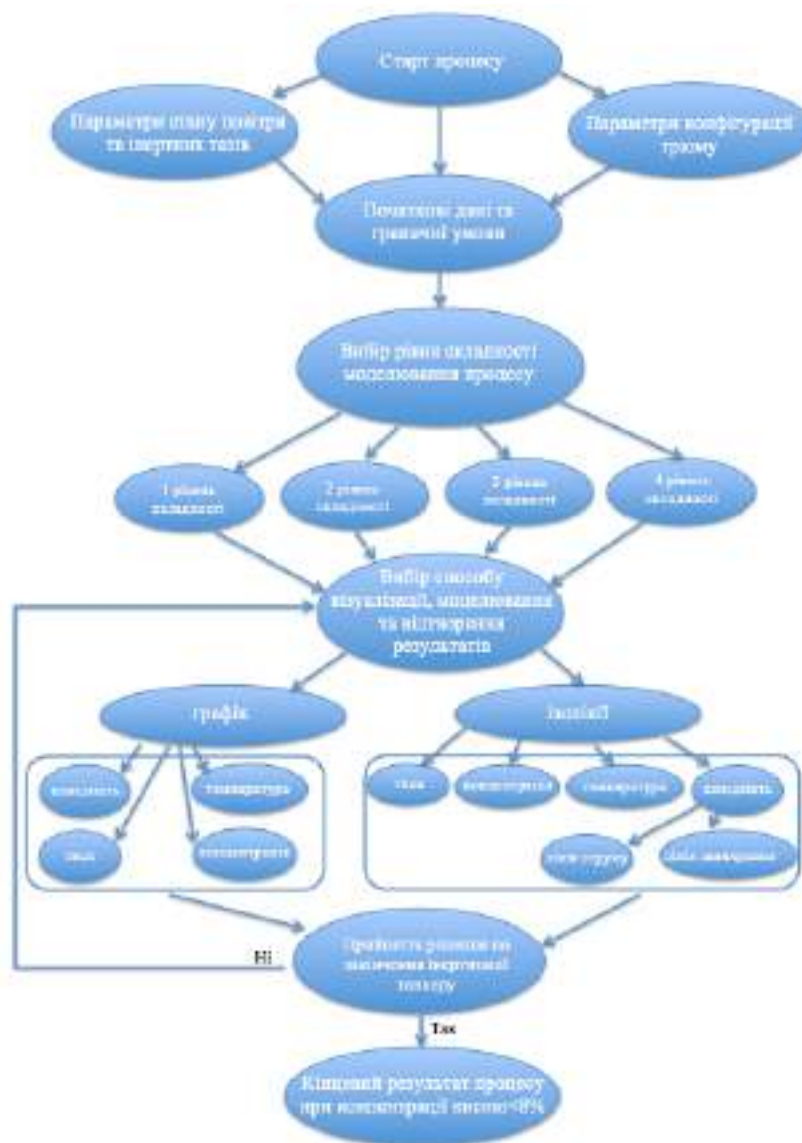


Рисунок 4.9 – Сценарій формування дерева рішень

Як це видно на приведеній схемі загальним показником якості процесу під час прийняття рішень на всіх рівнях виступає концентрація кисню всередині вантажного приміщення танкера. Саме цей показник і необхідно використовувати як індикатор кінцевого результату на протязі всього процесу інертизації танкера.

В умовах реального виробництва і характерних для нього технологічних процесах велика частина гідродинамічних потоків характеризуються своєю унікальністю [72]. У зв'язку з цим для їх візуалізації необхідно сформулювати правила вибору характерних параметрів.

4.2. Результати візуалізації аеродинамічних потокових даних при інертизації вантажних трюмів танкера

При проведенні досліджень було розглянуто питання про ступінь відповідності розробленої технології візуалізації АПД з тими даними, які виходять за межі інформаційної обробці картини перебігу реальних потоків.

Порівняльний аналіз може бути проведений двома шляхами - зіставленням візуального відображення якісних результатів руху і порівнянням кількісних даних.

У першому випадку в якості результатів можна використовувати характерні застійні зони всередині трюму, злами ліній струму на межах поділу димових газів і повітря, розташування точок відриву потоку на жорстких поверхнях; розташування, кількість і розміри вихрових структур в потоці і т.п.

У другому випадку характерним результатом може бути розподіл будь-якого технологічно важливого параметра в характерному перерізі потоку. В цьому випадку можуть використовуватися числові значення градієнтів зміни основних величин процесу. Прикладом таких величин є швидкість,

концентрація або тиск в локалізованих точках або в характерному перерізі потоку.

Використання інформаційних технологій, як це показано в розділі 4.1 в комбінації зі стандартним вимірювальним обладнанням для контролю процесу інертизації вантажних трюмів танкера дозволяє контролювати якість самого процесу в цілому. Цей підхід був реалізований в розробленому програмному забезпеченні. Побудова картини розподілу концентрації кисню всередині трюму, відображена на рисунку 4.10.

Графічне відображення на рис.4.10 містить порівняльний аналіз даних, що формуються від двох інформаційних потоків - потоку від програмного

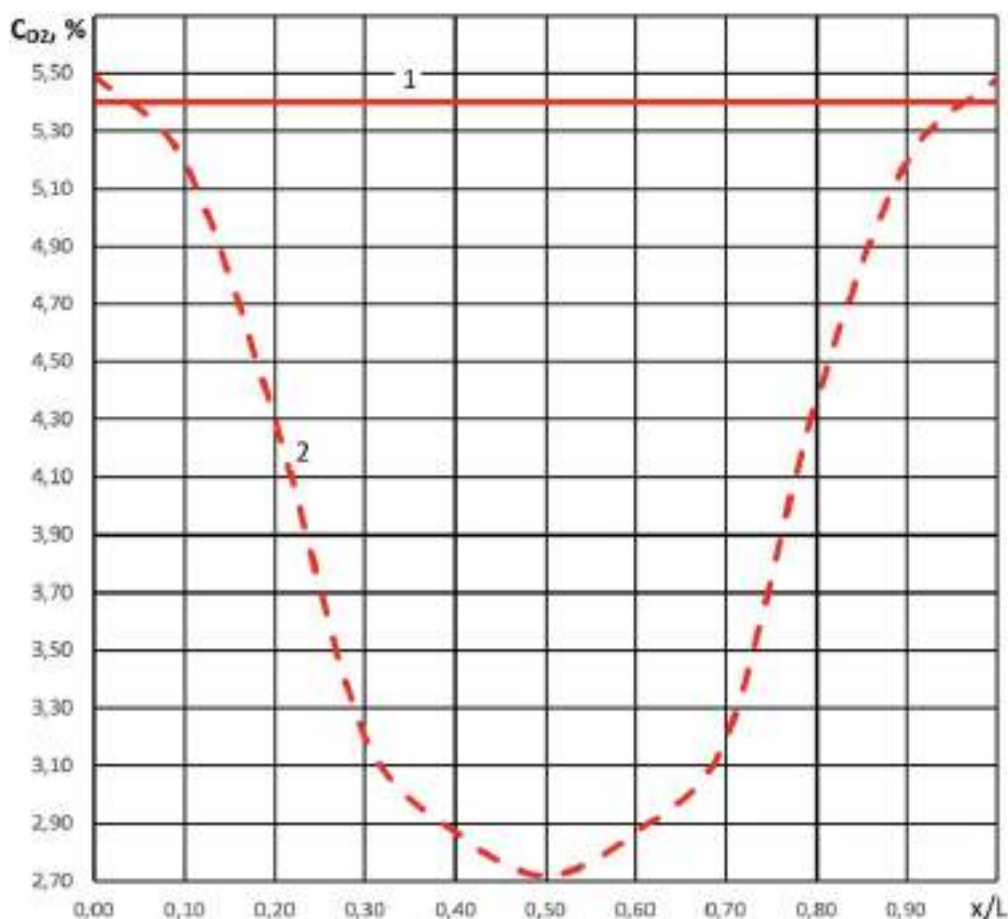


Рисунок 4.10 – Порівняння значень концентрації кисню в трюмі

1 – показання газоаналізатора на виході з трюму

2 – результат використання інформаційних технологій;

комплексу (пунктирна лінія 2) і потоку від засобів вимірювання (суцільна лінія 1). Ця візуалізація поточного стану процесу вентиляції показує розподіл концентрації кисню в самому верхньому поперечному перерізі трюму. Саме в цьому перерізі знаходиться місце виходу двофазного потоку в навколишнє середовище. У стандартній схемі контролю процесу інертизації танкера в цьому перерізі (вихідному отворі люку) встановлюється штатний газоаналізатор, який дозволяє робити висновок про необхідність подальшого закачування в трюм димових газів або зупинки процесу вентиляції вантажних трюмів танкера.

На наведеному графічному образі видно, що в момент часу, відповідний повного заповнення трюму інертними газами засоби вимірювальної апаратури показували, що концентрація кисню перевищує допустимі норми 5 % і становить 5,4 %. Ці дані відображаються в візуалізації користувача у вигляді прямої лінії.

У вигляді пунктирною лінії показані результати використання програмного комплексу. Інтегрування цієї кривої, яка на відміну від попередньої прямої лінії (лінія 1 на рис. 4.10) дозволяє отримати оцінку, яка вже відповідає всьому розрахунковому перетину, а не точковому місцю розташування газоаналізатора. Така інтегральна оцінка однозначно показує, що процес інертизації вантажних трюмів танкера задовольняє всім нормативним показникам і може бути завершений.

Чисельне інтегрування наведеної на рис. 4.10 функції дає результат, який показує, що концентрації кисню становить величину 4,08 %. Це відповідає нормативним значенням і дозволяє капітану танкера - ОПР прийняти рішення щодо завершення технологічного процесу.

В ході досліджень на судні була використана описана вище потокова інформаційна обробка поточних результатів процесу заповнення вантажного трюму танкера інертними газами. В кінцевому підсумку було встановлено, що найбільш достовірні результати про розподіл концентрації кисню всередині трюму суднові газоаналізатори дають при розташуванні створів для відбору газових проб на відстані, що перевищує 10 % від ширини або глибини трюму (в

залежності від конструкції танкера). В цьому випадку чисельні значення залишкової концентрації кисню, що були одержувані за допомогою розробленого програмного комплексу і за рахунок вимірювань збігалися з похибкою, що не перевищувала значення 1,7 %.

У загальному випадку розробка спеціалізованого програмного забезпечення по відтворенню гідродинамічних течій в виробничих процесах є стандартною і не відрізняється від розробки будь-яких інших програмних комплексів. Вона повинна виконуватися відповідно до існуючих правил і вимог до побудови архітектури і виконавчих алгоритмів програмного комплексу, які найбільш повно описані в роботах [73, 78, 81, 87, 103, 71, 111].

При складанні методики розробки спеціалізованого програмного забезпечення для візуалізації АПД було сформульовано ряд основних положень. Вони розкривають основні специфічні питання, що виникають під час такого процесу. Їх реалізація в створюваному програмному комплексі або спеціалізованому програмному продукті забезпечить отримання головного результату - зниження витрат потужності використовуваних ЕОМ і підвищення якості візуалізації основних параметрів гідродинамічних процесів. До цих положень відносяться:

1. Перед початком процесу інформаційного опису процесу необхідно використовувати описаний в другому розділі ієрархічний рівень рівнянь для подальшого математичного моделювання. Після аналізу складності процесу необхідно надати користувачеві можливість визначити рівень прийнятної точності відтворення результатів для контролю за параметрами процесу. Для цього в програмному продукті необхідно передбачити діалогове вікно, що відображає можливості візуалізації та необхідні для цього обчислювальні ресурси. Приклад такого діалогового вікна показаний на рисунку 4.11. На ньому видно, що користувач може визначати ступінь збігу отриманих результатів з реальним процесом і тривалість роботи програмного комплексу, яка завжди повинна ґрунтуватися на реальних робочих характеристиках використовуваної ЕОМ.

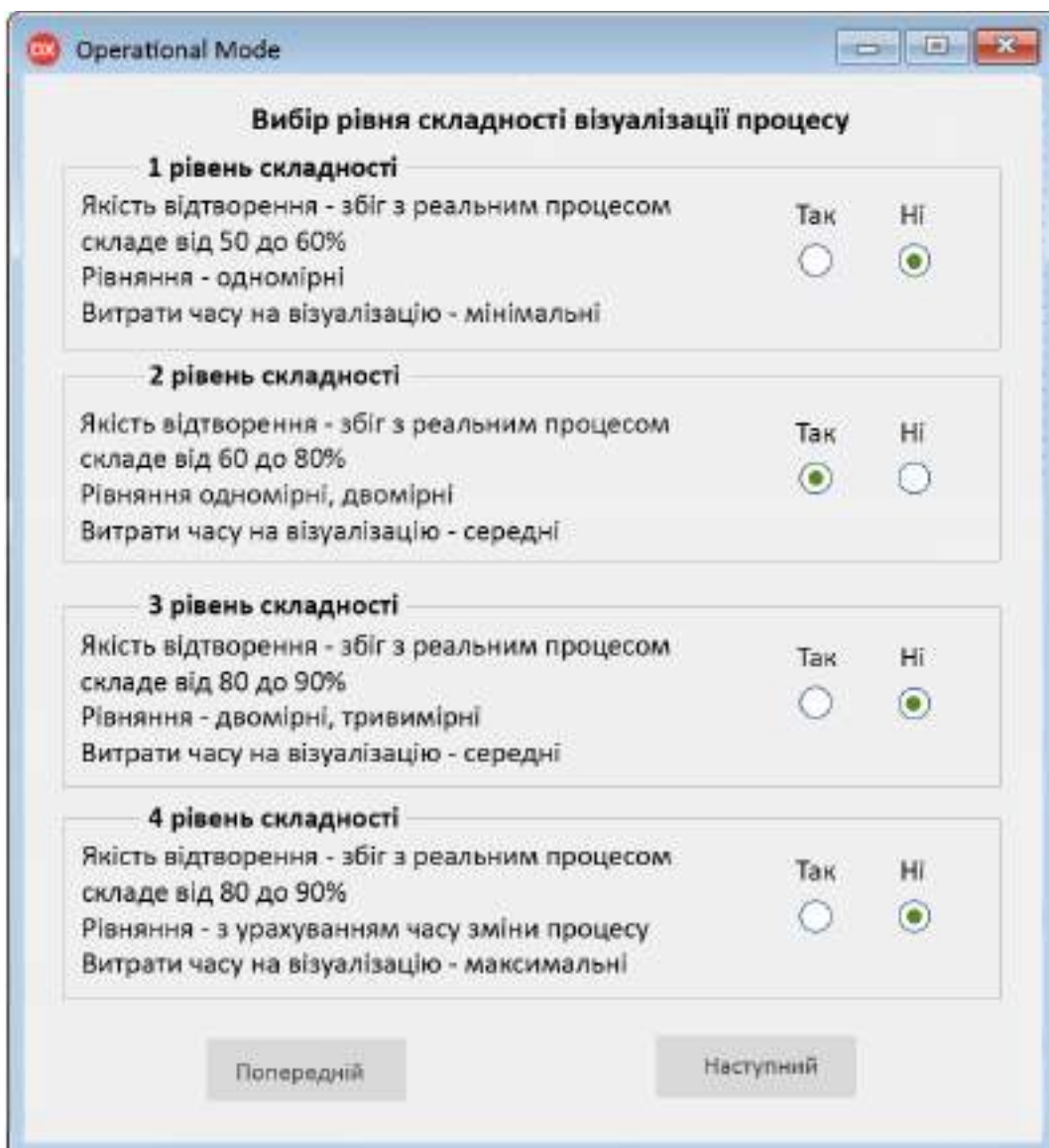


Рисунок 4.11 – Діалогове вікно для вибору ієрархії рівнів

При розробці інформаційної технології для використання в періодичному гідродинамічному процесі (наприклад, при інертизації вантажних трюмів танкера) все діалогові показники робочого процесу можуть бути представлені в чисельному вигляді: тривалість в одиницях часу (годину, хв., сек.), якість візуалізації - в показниках похибки залишкової концентрації кисню в трюмі танкера (відсоток, масова частка) і т.п.

2. Розробник повинен надати користувачеві можливість сформулювати перелік основних робочих параметрів і встановити якісний рівень їх відтворення. Для управління необхідними для роботи інформаційної технології

ресурсами потужності використовуваної ЕОМ слід надати користувачеві можливість виведення робочих параметрів в трьох режимах - постійному, проміжному і остаточному.

Приклад діалогового вікна вибору робочих параметрів і способу їх візуалізації показаний на рисунку 4.12.

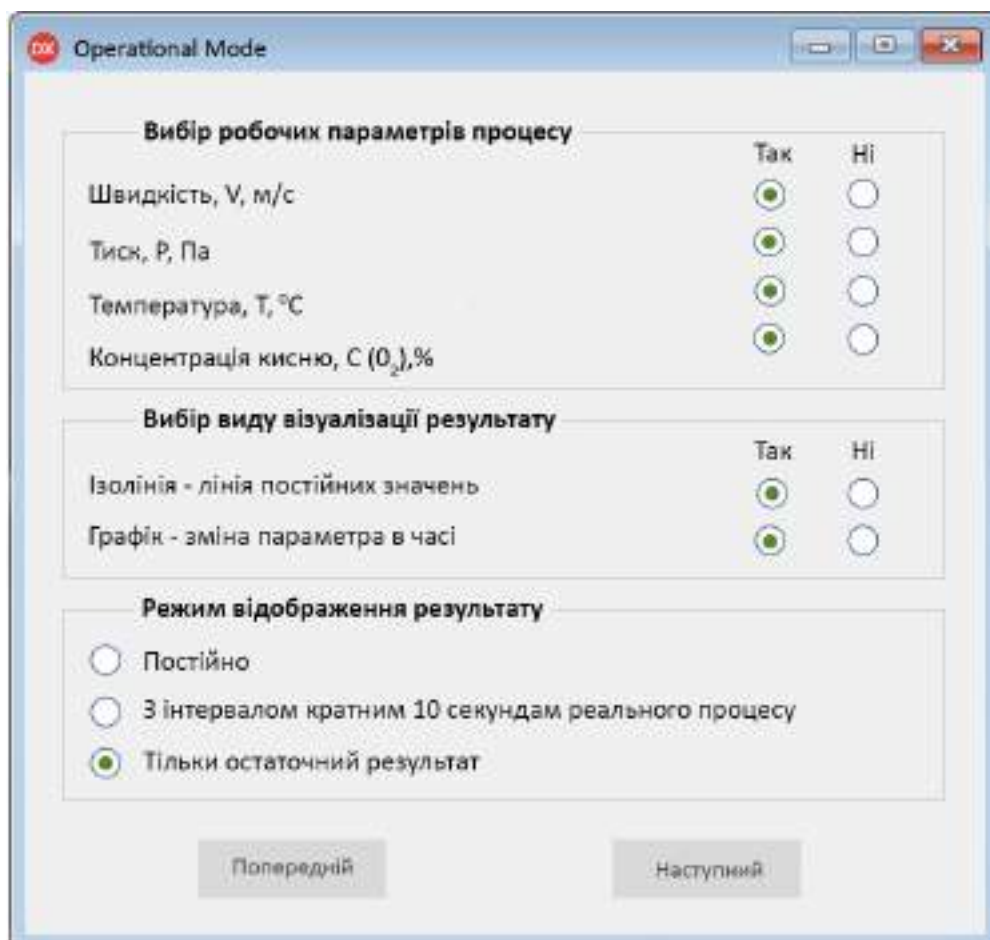


Рисунок 4.12 – Діалогове вікно для вибору робочих параметрів

Слід завжди враховувати, що якість подальшого відображення конкретних значень робочих параметрів або візуалізація їх розподілу всередині заданого простору (площини або об'єму) безпосередньо залежить від числа розрахункових вузлів, що використовуються під час роботи програмного комплексу. Вони, спільно з вихідними характеристиками процесу повинні задаватися користувачем.

Діалогове вікно користувача показано на рисунку 4.13, де видно, що перед початком процесу інертизації користувачеві надана можливість введення:

Form1

Введення початкових даних

Геометрія трюму

Довжина 10

Ширина 12

Висота 7

Число розрахункових вузлів

I 10000

J 12000

k 7000

Діаметр випускного отвору

Фізичні параметри

Температура вхідних газів 64

Об'ємна витрата димових газів 27

Тиск вхідних газів 135692

Старт

Рисунок 4.13 – Діалогове вікно для введення вихідних робочих параметрів

- геометричних розмірів вантажного трюму танкера і кількості розрахункових вузлів, які будуть використовуватися в інформаційній технології для відображення робочих параметрів;

- початкових значень температури, витрати і тиску потоку інертних газів на вході в вантажний трюм.

3. Виведення на екран користувача картин візуалізації розподілу параметрів робочого процесу доцільно виконувати тільки після стабілізації зміни тих контрольних показників, які відображають якість або ступінь виконання процесу.

Критерієм стабілізації повинен виступати в цьому випадку градієнт зміни в часі контрольованої величини (швидкості, тиску, концентрації, маси, температури і т.п.). Якщо нев'язка показань однієї і тієї ж величини в ідентичному обсязі (розрахунковому вузлі, розрахунковому перерізі, розрахунковому обсязі і т.п.) між двома сусідніми тимчасовими шарами стає менше 10 % то графічна інформація повинна бути виведена на екран користувача для інтерактивного контролю результатів і прийняття рішення щодо продовження або зупинці технологічного процесу.

4. У більшості випадків реальні процеси за участю рухомих потоків рідини або газу управляються нормативними величинами або правилами техніки безпеки. З цієї причини під час візуалізації все робочі параметри, які виходять за межі нормативних значень повинні відображатися у вікні користувача як відмінні від стандартних величин. Індикацією може бути колірна гамма - червоний колір, миготлива індикація і т.п. або вид ліній - заміна суцільних ліній на інший тип ліній (пунктирні або точкові і т.п.).

Окремим рівнем в методиці розробки спеціалізованого програмного забезпечення є комплекс алгоритмів і коду, призначених для моделювання АПД на основі математичного апарату.

При розробці математичного блоку програмного комплексу в першу чергу необхідно звертати увагу на такі специфічні особливості:

1. Згущення ліній, що містять вузли розрахункової сітки, рекомендується використовувати не в статичному, а в динамічному режимі.

Унаслідок завищених вимог до потужності використовуваних ЕОМ і їх обсягів пам'яті використання великого числа розрахункових вузлів в процесі моделювання можна розглядати, як вже застарілу технологію.

Правильним рішенням є використання динамічних розрахункових сіток, які згущуються в області високих градієнтів зміни основних характеристик потоку (ліній відриву, вихрових згустків, зон розрядження і т.п.) і розширюються в області малих значень градієнтів зміни робочих характеристик потоку.

Використання різних видів розрахункових сіток (прямолінійна, криволінійна, набір багатогранників або торів і т.п.) в даному випадку не є принциповим. Принцип згущення розрахункових вузлів в залежності від величини градієнта розрахункового параметра залишається в цьому випадку універсальним.

2. Чисельне значення розрахункового часового кроку рекомендується ставити в межах від 0,001 до 0,015. Величина кроку повинна бути кратною числу два.

При використанні рівнянь четвертого рівня складності з використанням консервативних кінцево-різницевих схем присутність "часового доданка", тобто члена рівняння, який містить часову координату може призводити до нестійкості обчислювального процесу. Для усунення цього недоліку під час проектування на рівні алгоритму рекомендується передбачити опцію, яка дозволяє в момент початку нестійкості зафіксувати поточний часовий рівень. В цьому випадку всі масиви чисельних даних необхідно заповнити наново зі зменшенням величини кроку по часу на величину, що становить половину від поточного значення часового кроку. Після отримання обчислювальної стійкості алгоритм завдання часового кроку повинен зробити повернення до початкової величини кроку.

Оптимальними значеннями є початковий крок що дорівнює величині 0,01, а скорочений крок, рівний величині 0,005. При слабкій розбіжності можна використовувати крок що дорівнює величині 0,0075.

З точки зору якісного сприйняття інформації, яка відображається при візуалізації гідродинамічних потоків особлива увага повинна приділятися кольоровій адаптації. За рахунок зміни кольорової палітри можливо підвищити якість сприйняття користувачем інформації. Прикладом такої яркостної адаптації є рисунок 4.5, де видно, що в момент виходу концентрації кисню на задане нормативне значення подальшої побудови інтегральної характеристики проводиться в іншій кольоровій палітрі. При прийнятті рішень про зупинення

або продовження технологічного процесу така індикація для ОПР є найбільш наочною і простою для сприйняття.

У більшості гідродинамічних процесів параметри, що розраховуються або їх розподіл є невідомими. В цьому випадку розроблена інформаційна технологія передбачає використання методики прямого моделювання процесу.

У разі прямого моделювання візуалізація гідродинамічного процесу може бути виконана після реалізації наступних модульних блоків.

Блок № 1. На програмному рівні необхідно виконати оцінку доступних для моделювання та візуалізації ресурсів ЕОМ. До таких основних ресурсів відносяться: обсяг пам'яті, потужність і кількість процесорів, параметри використовуваної відеокarti, вільний обсяг дискового простору і т.п.

Блок № 2. У коді на рівні опису констант і змінних, а також з використанням розрахункових співвідношень необхідно описати геометричні розміри всіх статично і динамічно змінюваних границь, які описують область візуалізації. До таких границь відносяться не тільки жорсткі поверхні розрахункового обсягу (стінки, перепони, решітки, що направляють і т.і.), але і початкові межі рухомих струменів, хиткі рівні меж розділу різних потоків або середовищ, швидкість і тиск потоку в області вихідного перетину потоку і т.і.

Приклад опису граничних умов у вигляді рівняння (2.14) наведено в розділі 2.2. В якості граничної умови для опису руху потоку вздовж, але не через жорсткі межі трюму танкера складові швидкості і концентрація повітря і димових газів були прийняті рівними нулю.

Блок № 3. У коді на рівні опису констант і змінних, а також з використанням розрахункових співвідношень необхідно описати всі властивості відтворюваного потоку, які необхідно враховувати при його моделюванні і візуалізації. Для всіх рідин і газів ці властивості широко представлені в довідковій літературі.

Приклад розрахункового співвідношення для опису величини щільності повітря в вигляді рівняння (1.1) наведено в першому розділі, а щільності димових газів у вигляді рівняння (4.1).

Блок № 4. В кодї у вигляді логічних умов необхідно записати в математичній формі запису все статичні і динамічні початкові умови. Це необхідно виконати для опису параметрів стану потоку в початковий момент часу.

Основними динамічними характеристиками АПД, які завжди використовуються в візуалізації потоку є швидкість і тиск. Їх вигляд визначає якість одержуваного результату і завжди повинен враховувати реальний стан гідродинамічного потоку в виробничому процесі.

Приклад епюри швидкості ламінарного потоку всередині циліндричної труби і плоского каналу у вигляді рівнянь (1.5) і (1.6) приведені в першому розділі.

У ряді випадків розподіл параметра, що цікавить користувача є невідомим. З цієї причини при візуалізації початкова база числових значень АПД для нього не може бути сформована. У цьому випадку на етапі розробки коду необхідно надати користувачеві вибір стандартних законів розподілу. В якості функцій, які найбільш часто зустрічаються в виробничих процесах необхідно використовувати такі: лінійну, тригонометричну і ступеневу [44].

Найбільш часто під час візуалізації до статичних функцій відносять величину тиску в нерухомому потоці. Вона описується відомим законом [48]

$$P = P_0 + \rho gh \quad (4.2)$$

де P_0 – зовнішній тиск, Па, ρ – щільність рідини, кг/м³; g – прискорення вільного падіння, м/с²; h – відстань від вільної поверхні рідини до точки, в якій визначається тиск, м.

Блок № 5. Створення на програмному рівні масивів даних для опису геометрії розрахункового обсягу у вигляді набору масивів координат і масивів статичних і динамічних характеристик потоку.

Ця операція повинна виконуватися у внутрішніх і в зовнішніх циклах. Їх кількість визначається розмірністю простору, яке потрібно візуалізувати під час

застосування інформаційної технології. Зовнішні цикли визначають кількість рівнів часу (від двох до трьох залежно від порядку вірогідності використовуваної кінцево-різницевої схеми рішення рівнянь руху) при відтворенні нестационарних процесів.

Приклад коду для блоку № 5 у разі розрахунку координат X (ширина), Y (висота), Z (глибина) тривимірного прямокутного простору для перших двох рівнів часу (розрахункова схема другого порядку точності) має вигляд:

```
for t=1 to 2 do
begin
for Z=0 to k do
Z[0..K]= ...
begin
for i=0 to N do
begin
X[0..N]=...
for j=0 to M do
begin
Y[0..M]=...
end;
end;
end;
end.
```

Блок № 6. Реалізація в коді програми математичного моделювання виробничого процесу з метою отримання масивів даних для візуалізації гідродинамічного потоку.

Цей блок в разі моделювання виробничих процесів з використанням чисельних методів другого порядку вірогідності починається на третьому часовому рівні. У реальному виробничому процесі третій часовий розрахунковий рівень відповідає початку відліку часу, тобто нульовий секунд.

У блоці № 6 завжди має передбачатися використання ітераційних процедур з використанням константи невязки. Ітераційний процес повинен здійснюватися в разі перевищення градієнта зміни (різниці числового значення параметра в точці на поточному та попередньому часовому шарі) величини заданого значення невязки в кожному окремо взятому розрахунковому вузлі. Вона повинна відповідати збіжності обчислювального процесу до єдиного

сталого вирішення. При побудові образу візуалізації така збіжність відповідає відсутності локальних флуктуацій параметра, що відображається.

У більшій частині розрахункових вузлів усі величини реального технологічного процесу зазвичай змінюються плавно (за винятком вибухових процесів). З цієї причини використання в інформаційній технології ітераційної процедури для збіжності на програмному рівні не буде приводити до сильного збільшення витрат машинного часу.

Блок № 7. Блок візуалізації параметрів, який передбачає використання додаткових налаштувань, встановлених користувачем.

Для скорочення ресурсів ЕОМ, які потрібно використовувати при візуалізації характеристик робочого процесу необхідно на рівні написання коду встановлювати обмежувачі кратності відтворення картин візуалізації динамічних показників процесу.

Алгоритм створення такого обмеження досить простий, оскільки в більшості випадків час протікання процесу відомий. Вибір інтервалу може зводитися до його розбивці на ідентичні відрізки. Така опція повинна бути передбачена в діалоговому вікні користувача.

У ряді випадків основні характеристики робочого процесу частково є доступними до початку розробки програмного продукту [108]. У цьому випадку можливе використання алгоритму зворотного моделювання, коли формування масиву вихідних даних для візуалізації параметрів проводиться з використанням вже відомого розподілу.

У більшості випадків таке застосування інформаційної технології може бути затребуване якщо необхідно встановити оптимальний діапазон робочих параметрів течії. Прикладом може бути розглянутий в роботі процес інертизації вантажних трюмів танкера. Крім необхідності встановлення величини залишкової концентрації кисню всередині трюму може бути необхідно визначити такі оптимальні значення швидкості подачі інертних газів в трюм, які забезпечать вихід на нормативні значення за мінімальний час.

4.3. Застосування запропонованих рішень при візуалізації наукових досліджень

При проведенні теоретичних досліджень були виділені два напрямки, які можна розглядати як такі, що володіють загальними особливостями з точки зору руху рідини або газу.

Перший напрямок відповідає руху потоку, який з усіх боків обмежений жорсткими стінками. Таку течію надалі будемо позначати терміном "обмежений потік".

Другий напрямок описує всі типи руху, які відповідають необмеженому простору. В цьому випадку відсутній вплив жорстких кордонів на формування структури течії і в математичний блок розробленої інформаційної технології можна структурувати тільки той рівень моделювання, який описується механізмами вільної конвекції і дифузії.

При реалізації першого напрямку розробленої інформаційної технології візуалізації були побудовані полів течій, які відповідають в реальному житті кільцевому струменю. Загальна схема такої задачі показана на рисунку 4.14-а. Такі кільцеві струмені знаходять широке застосування в струменевих апаратах і

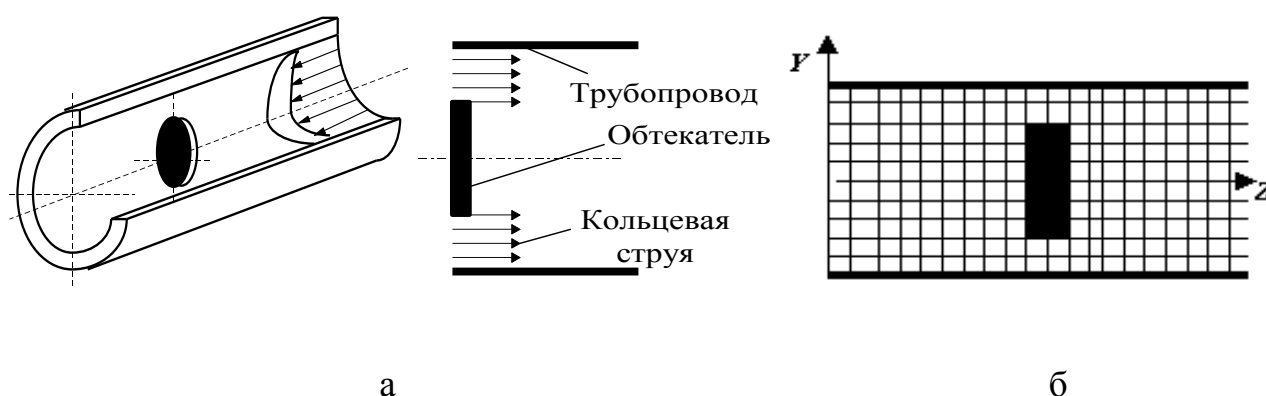


Рисунок 4.14 – Розрахункова схема завдання про рух кільцевого струменя
а - загальна схема; б - дискретне уявлення

технологіях, наприклад, для створення вакууму в робочій камері ежекторного насоса.

Кільцева струмись може утворюватися при русі потоку в області, утвореної бічною поверхнею обтічного твердого тіла в формі диска всередині циліндричної труби.

У разі невеликих швидкостей потоку, що рухається, тобто коли числа Рейнольдса відповідають діапазону $Re < 2500$ подібна задача може також використовуватися в медичному додатку гідромеханічних течій. Нестационарна постановка задачі про початок руху дискового серцевого клапана всередині людини практично повністю відповідає наведеним на рисунку 4.14-б розрахунковій схемі. Відмінність полягає лише в геометрії зовнішнього каналу, який є циліндричним тільки в першому наближенні і ступеня жорсткості (еластичності) його стінок.

В процесі візуалізації течії кільцевого струменя був використаний четвертий рівень складності розроблений і описаний в розділі 2 ієрархії математичних моделей. Чисельні масиви даних, що містять інформацію, яка описує рух потоку води в циліндричній трубі діаметром 100 мм при обтіканні диска діаметром 70 мм і шириною 10 і 20 мм були отримані для швидкості і тиску потоку, який моделювався як нестационарний.

Як приклад результатів моделювання можна привести візуалізацію в поздовжньому перетині поля завихореності, розглянутого в розділі 1.4 (вираз 1.8). Динаміка його зміни з інтервалом в 50 секунд розрахункового руху потоку показана на малюнках 4.15-4.23

Вихід на квазістационарних значення швидкості і тиску потоку отримувався в середньому протягом 400 секунд після початку руху модельованого потоку. Моделювання здійснювалося з використанням нестационарних рівнянь Нав'є-Стокса у вигляді системи (2.5), доповнених умовою типу Пуассона у вигляді рівняння (3.7) і вирішених за допомогою кінцево-різницевого методу та методу розщеплення, докладний опис яких наведено в попередніх розділах.

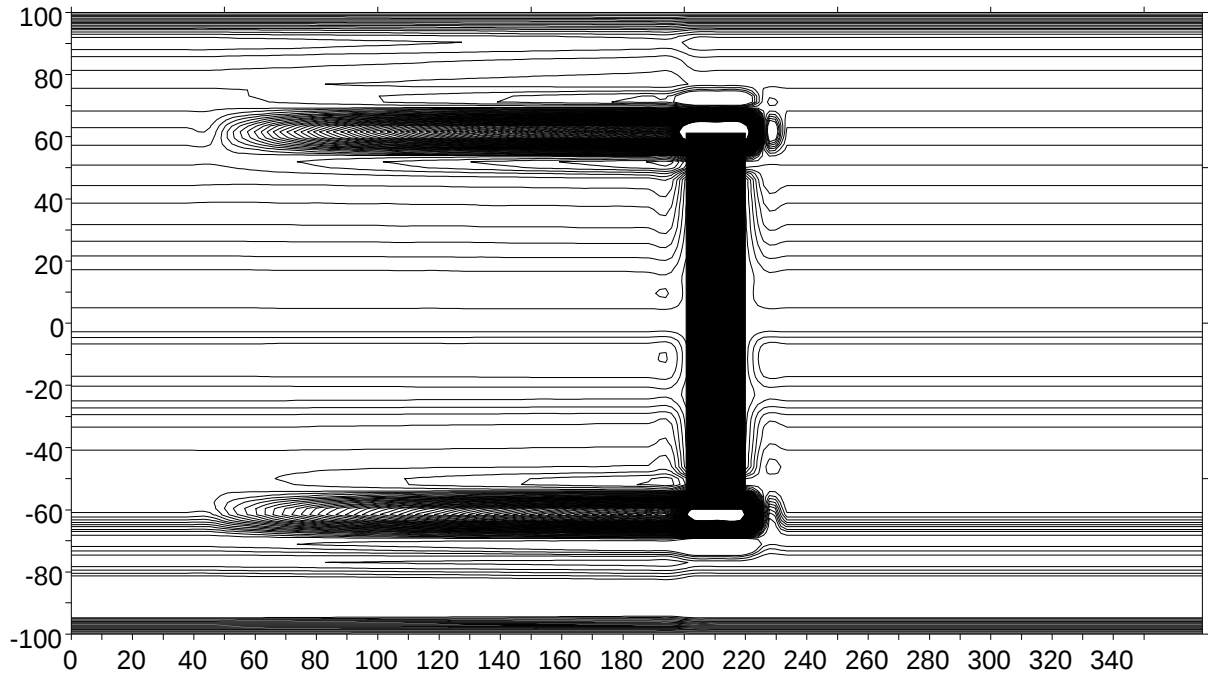


Рисунок 4.15 – Візуалізація поля завихореності в момент часу $t=0,03$ сек.

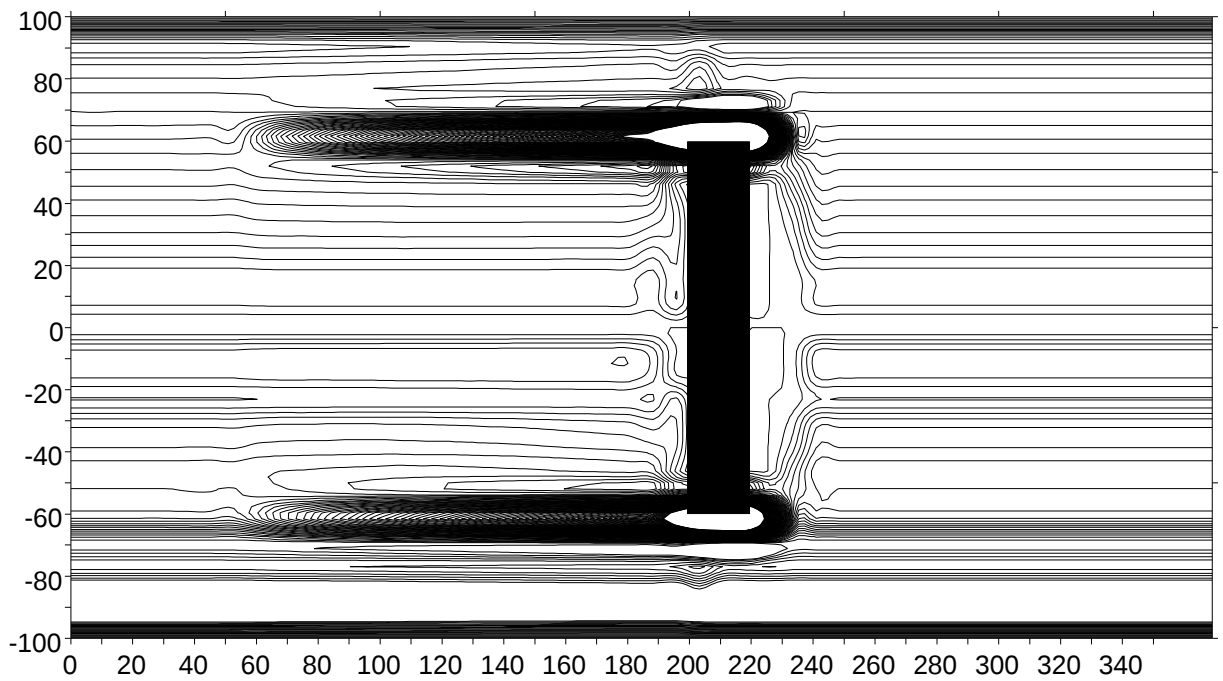


Рисунок 4.16 – Візуалізація поля завихореності в момент часу $t=50$ сек.

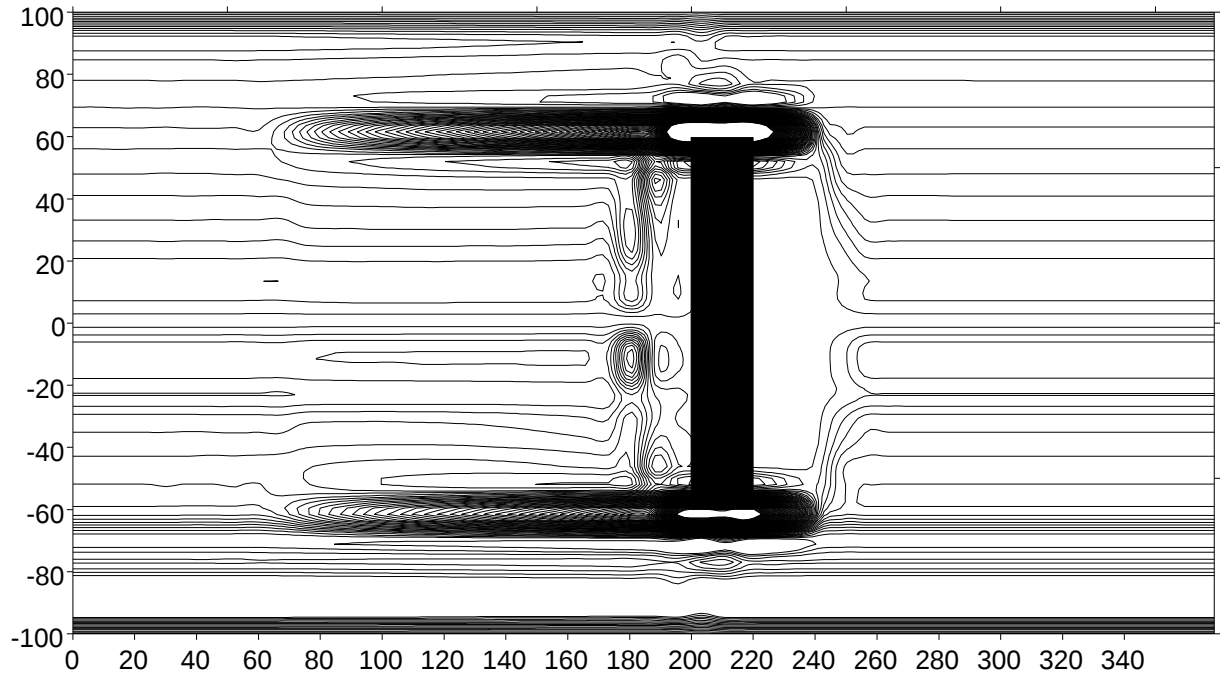


Рисунок 4.17 – Візуалізація поля завихореності в момент часу $t=100$ сек.

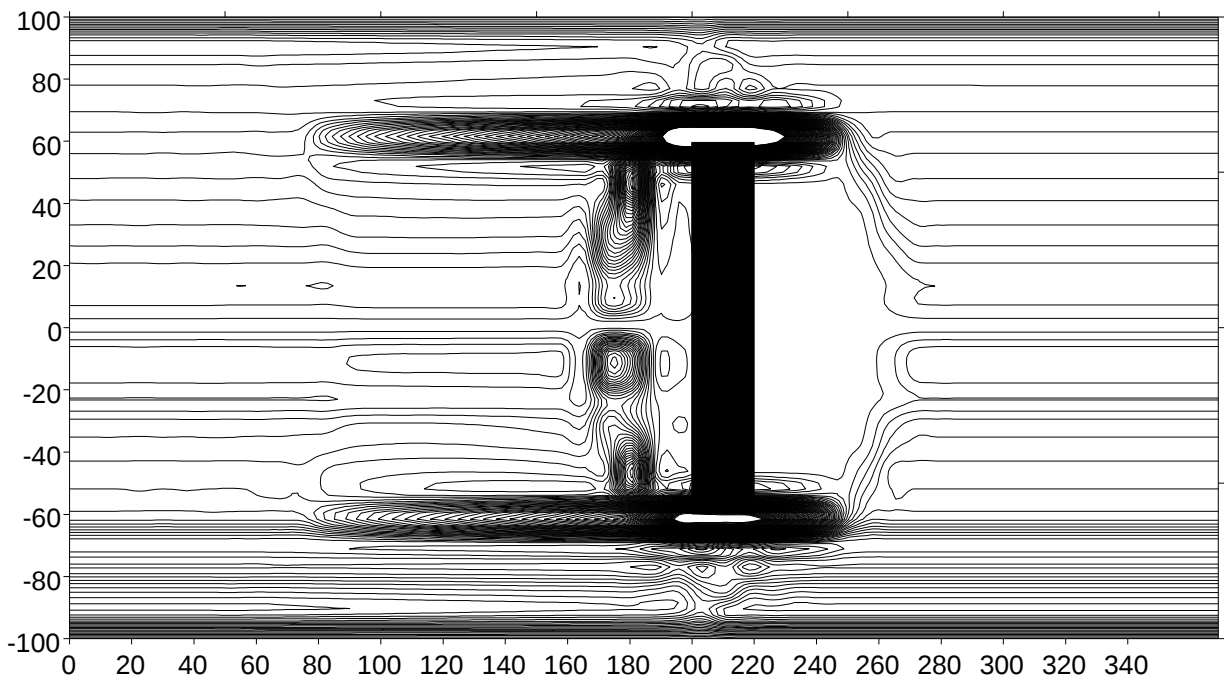


Рисунок 4.18 – Візуалізація поля завихореності в момент часу $t=150$ сек.

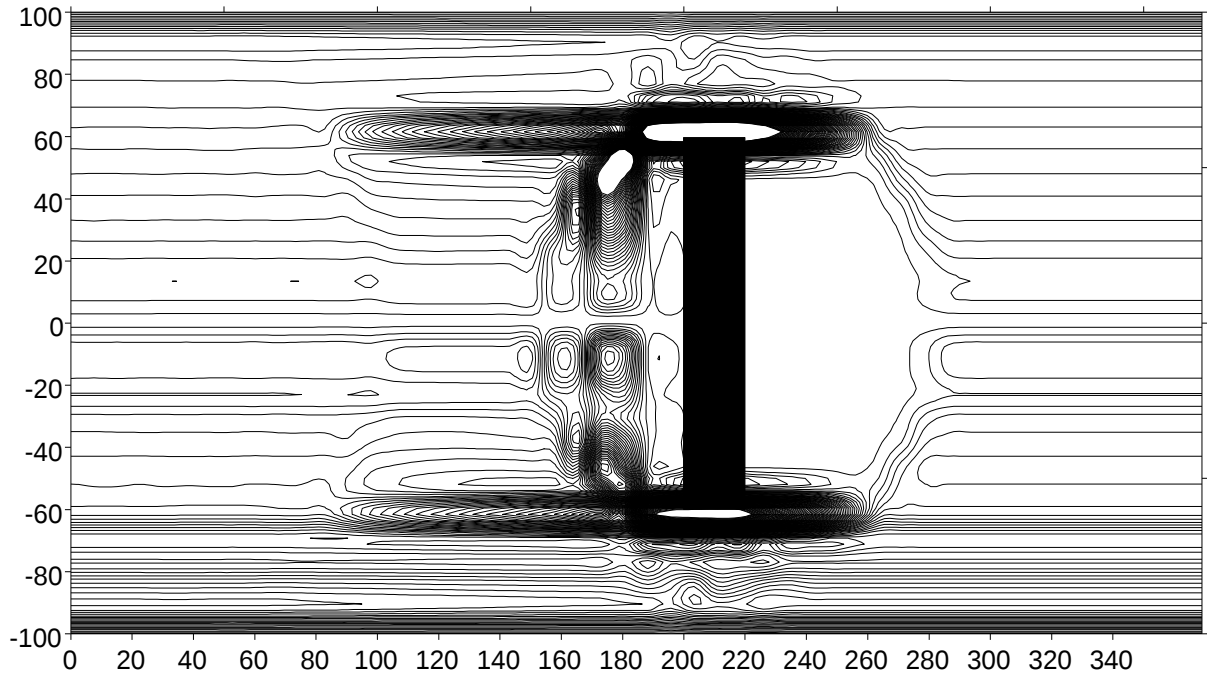


Рисунок 4.19 – Візуалізація поля завихореності в момент часу $t=200$ сек.

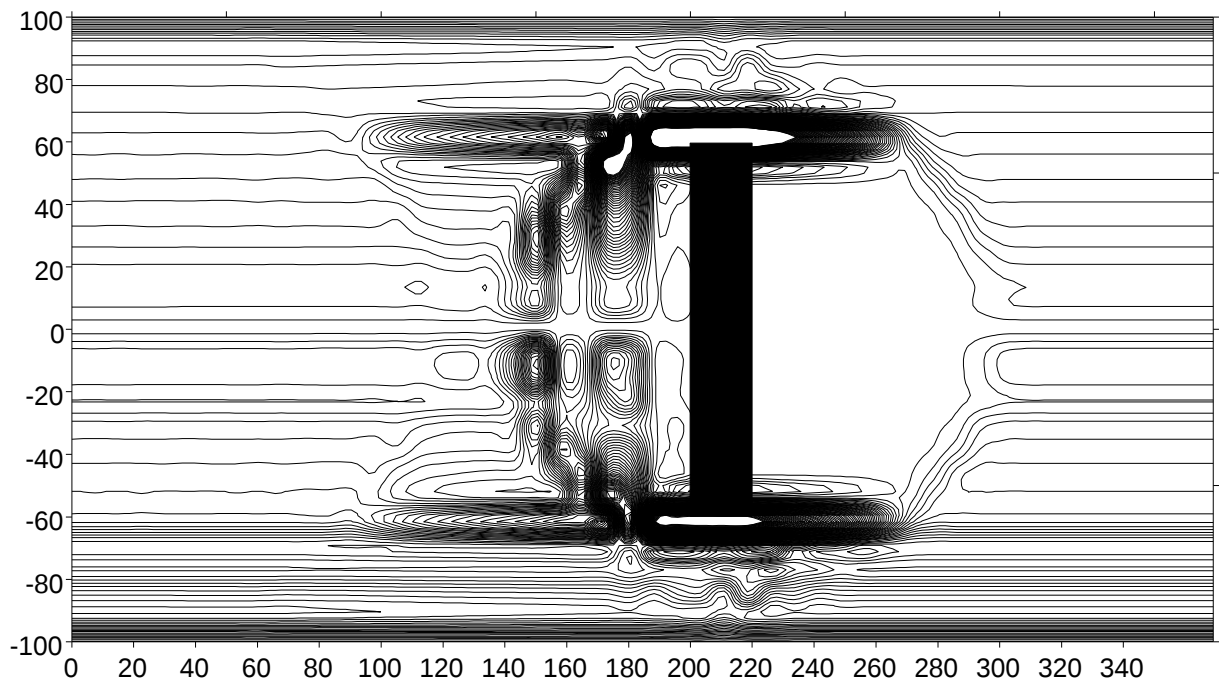


Рисунок 4.20 – Візуалізація поля завихореності в момент часу $t=250$ сек.

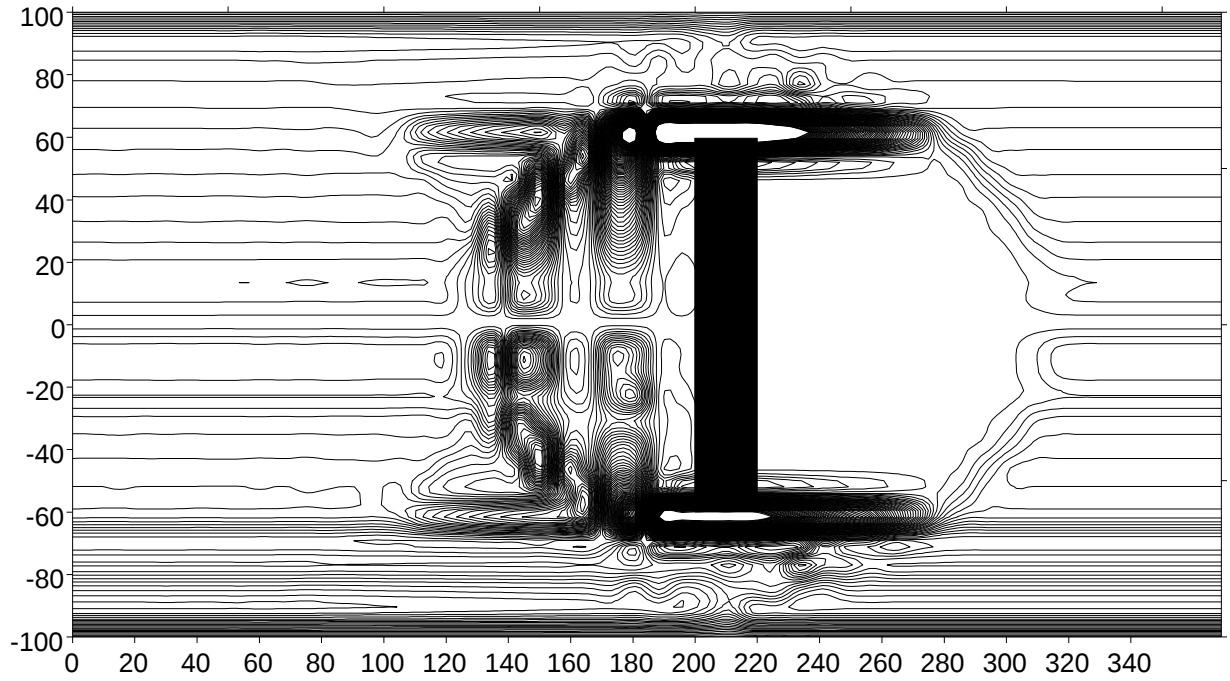


Рисунок 4.21 – Візуалізація поля завихореності в момент часу $t=300$ сек.

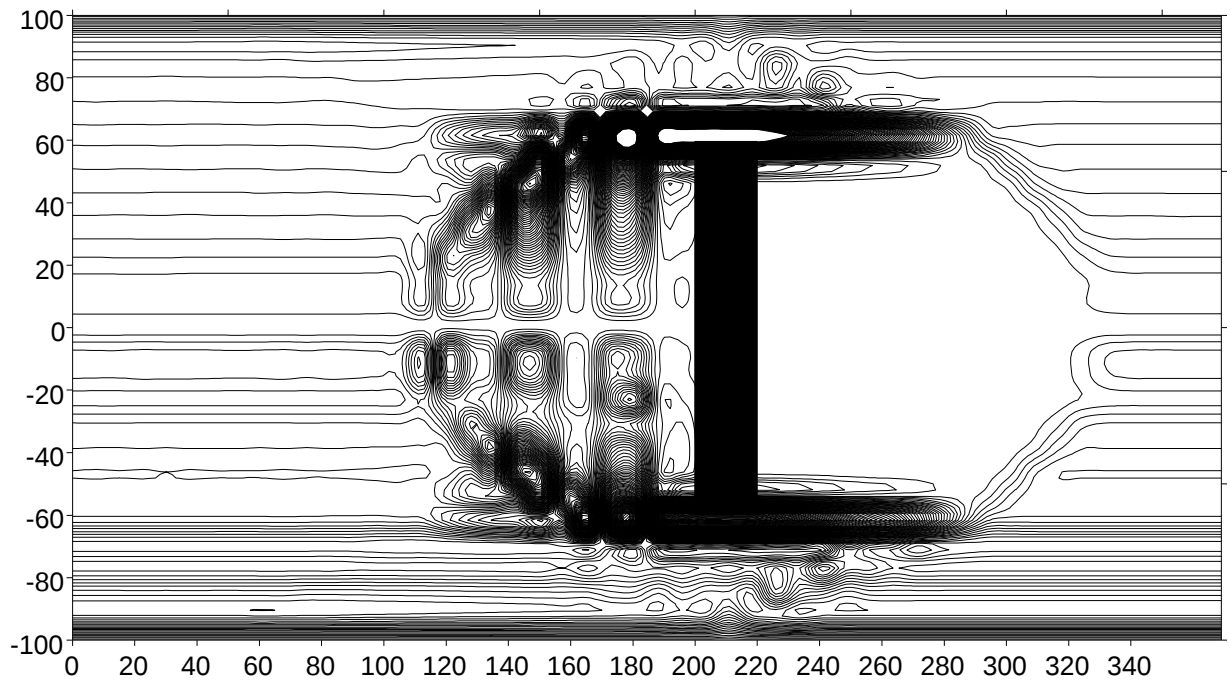


Рисунок 4.22 – Візуалізація поля завихореності в момент часу $t=350$ сек.

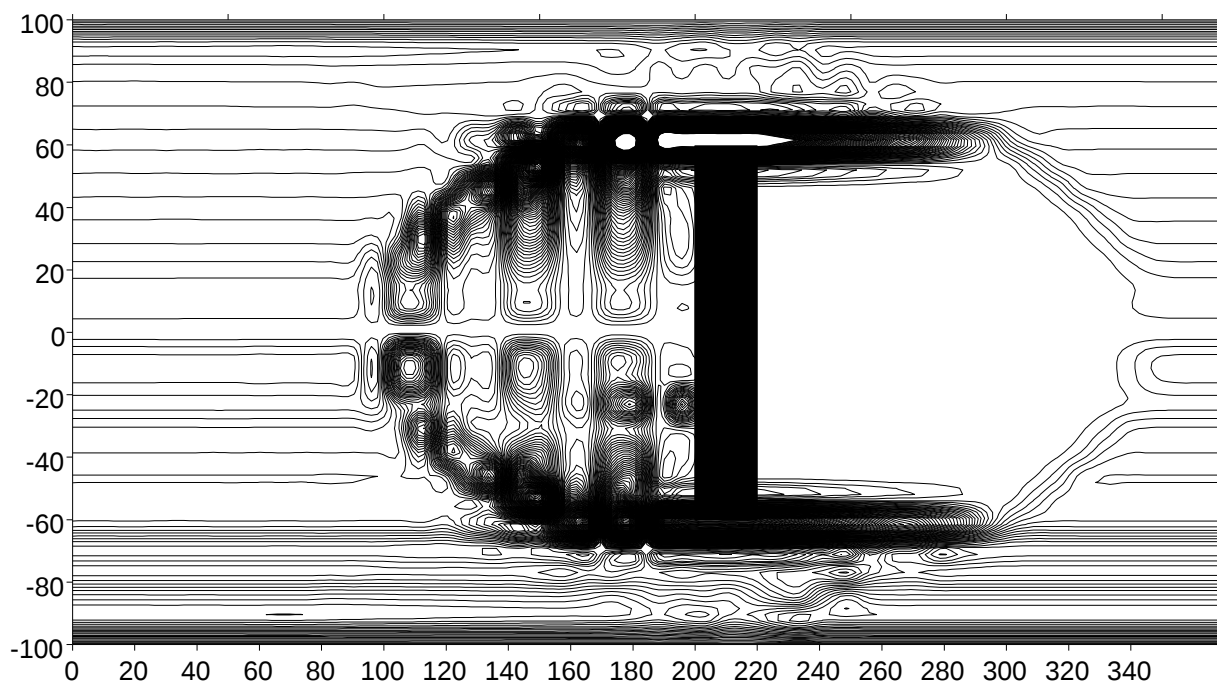


Рисунок 4.23 – Візуалізація поля завихореності в момент часу $t=400$ сек.

Візуалізація течії на основі процесу моделювання завжди передбачає оцінку якості і вірогідності такої графічної побудови. Як приклад основних результатів перевірки якості одержуваних результатів можна привести оцінку похибки щодо дотримання умови нерозривності потоку.

Отримані результати показані на рисунку 4.24. На ньому видно, що знак рівності, відповідний відсутності "притоку маси" під час моделювання задовольнявся в усіх точках розрахункового обсягу.

Ізолінії дисбалансу нерозривності потоку можливо було побудувати тільки в тильній частині потоку за диском, причому рівність нулю дивергенції швидкості знаходилося в межах від $8 \cdot 10^{-6}$ до 10^{-16} . Ця похибка наочно ілюструється рисунком 4.19, при побудові якого дисбаланс нерозривності потоку був збільшений в 10^6 разів. Настільки малі значення похибки викликані "чисельною в'язкістю" процесора у використаному обчислювальному обладнанні, а не похибкою використаного методу візуалізації або роботи програмного комплексу.

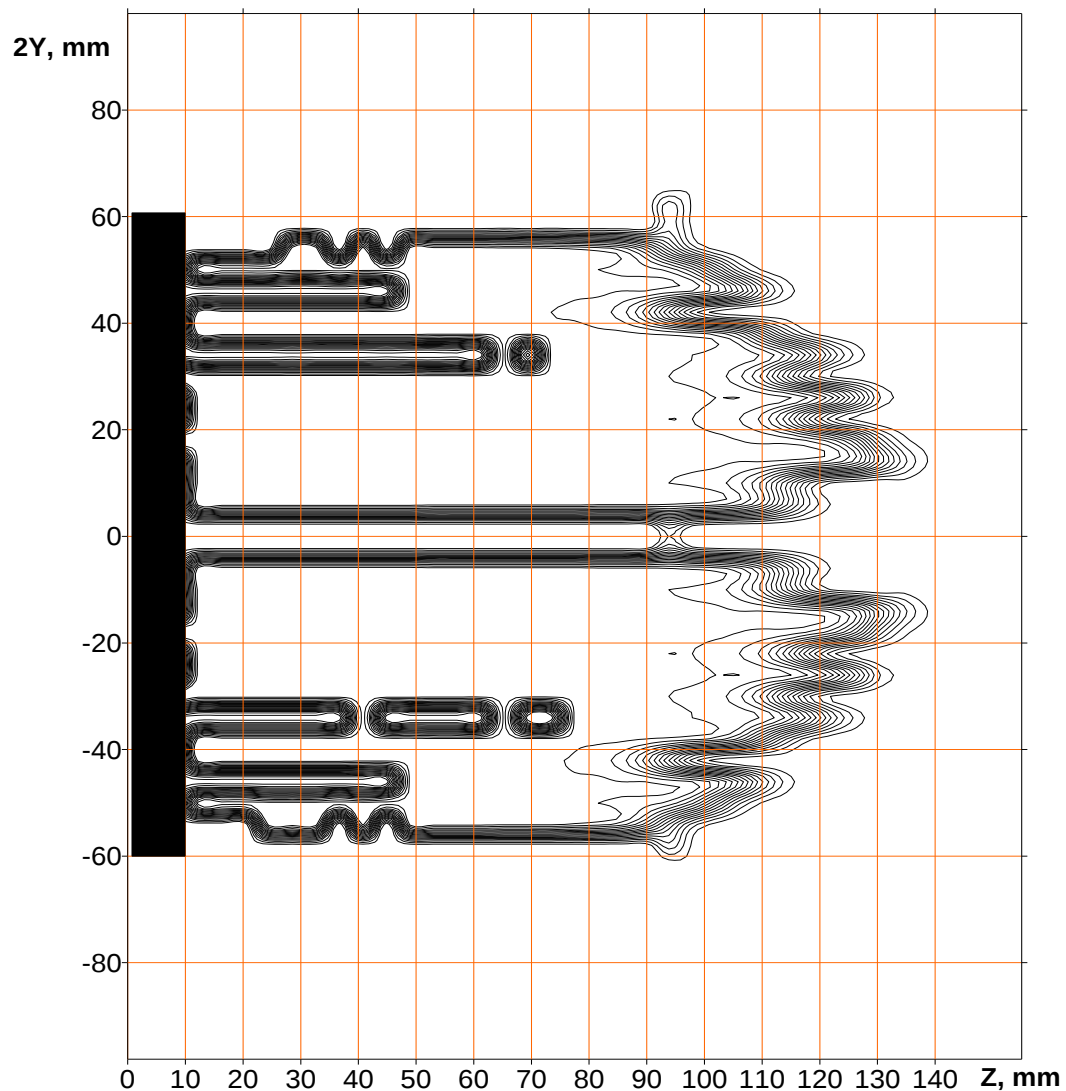


Рисунок 4.24 – Візуалізація похибки виконання умови нерозривності потоку в момент часу $t=400$ сек.

В ході побудови образів візуалізації в якості основного критерію якості використовувалося число Куранта (див. формулу 2.25). Результати розподілу цього критерію показані на рисунку 4.25. Для зручності сприйняття на графіку перерізі по всій довжині модельованої ділянки течії. Як видно на графіку, максимальні значення критерій Куранта приймає в місці розташування диска, що створює кільцевий струмінь. В основному це викликано видом запису використаної кінцево-різницевої апроксимації на кордоні розділу "потік-диск" в

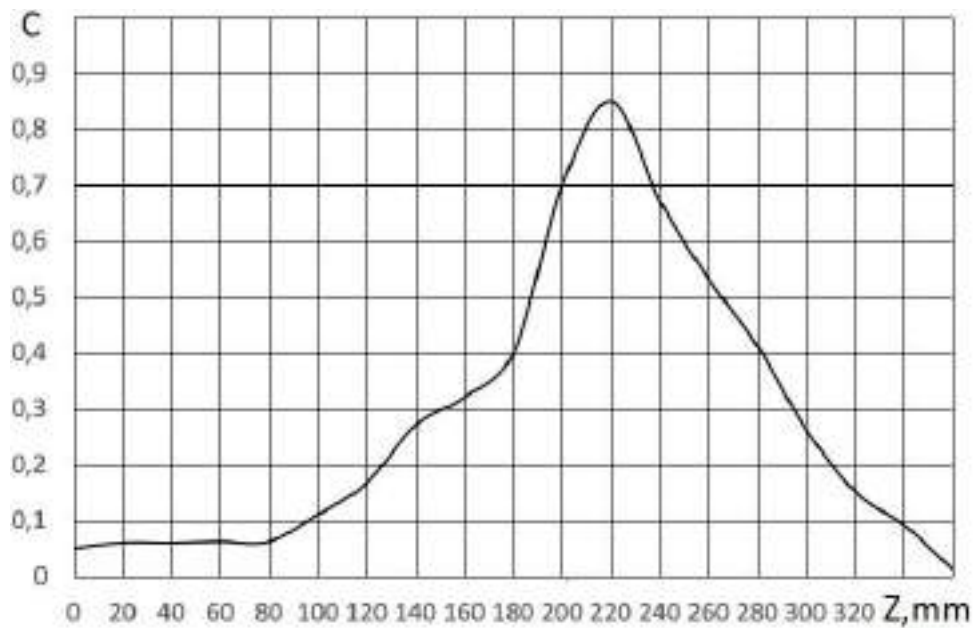


Рисунок 4.25 – Розподіл числа Куранта

наведені максимальні значення цього параметра в кожному розрахунковому застосованому математичному методі рішення рівнянь руху. Однак, як видно по всій довжині розрахункової області умова (2.25) виконувалося повністю.

На обох рисунках (4.24 і 4.25) видно, що при вирішенні задачі була досягнута висока якість одержуваних результатів візуалізації. Ні в одному з дискретних вузлів модельованої гідродинамічної течії похибка не перевищувала допустимих показників, опис яких наведено в другому розділі.

Відображення лінії струму (див. перший розділ), яка представлена рівнянням (1.12) є в ряді випадків просто необхідною. Тільки при використанні ліній струму можна побачити застійні області або відривні течії.

З цієї причини при відображенні характеристик гідродинамічного потоку необхідно використовувати характерні площини течії. В цьому випадку під час обробки трьох- або чотиривимірного масиву даних необхідно виконати перехід до "віртуально двовимірного" подання просторових результатів. Для цього рівняння (1.13) необхідно використовувати в новій формі запису виду

$$V_z dX - V_x dZ = \varphi dX dZ = const \quad (4.3)$$

За рахунок пропонованого перетворення на етапі відображення лінії струму модельованого гідродинамічного потоку виключається проекція швидкості на поперечний напрям (вісь ОУ). Оскільки при такій побудові ігнорується одна зі складових швидкості то необхідно враховувати той факт, що подібний підхід може бути коректно використаний тільки при відображенні просторово-симетричних АПД.

Пропонована рекомендація побудови лінії струму за рахунок ігнорування однієї зі складових швидкості дозволяє при обробці масиву вихідних даних будувати візуалізацію будь-який з трьох площин течії.

Дискретна форма запису рівняння (4.4) має вигляд

$$\varphi = \frac{V_z(X_{i+1}-X_i)-V_x(Z_{i+1}-Z_i)}{(X_{i+1}-X_i)} \quad (4.4)$$

Якщо використовується при апроксимації сітка постійна і використовує одиничний крок, то рівняння (4.4) спрощується до

$$\varphi = \frac{V_z(X_{i+1}-X_i)-V_x}{(X_{i+1}-X_i)} \quad (4.5)$$

При побудові картини візуалізації дані, одержувані з рівняння (4.4) або (4.5) є первинними, а подальше використання інформаційної технології повинно базуватися на введенні різних способів інтерполяції між ідентичними значеннями величини функції струму.

Якщо процес руху характеризується високими швидкостями, то при візуалізації обов'язковою умовою є використання завихореності. Її уявлення у вигляді рівняння (1.5) є складним для обробки. З цієї причини краще використовувати його видозмінений варіант

$$\frac{dx}{\left[\frac{\partial V_z}{\partial y}\right]} = \frac{dy}{\left[\frac{\partial V_x}{\partial z} - \frac{\partial V_z}{\partial x}\right]} = \frac{dz}{\left[-\frac{\partial V_x}{\partial y}\right]} \quad (4.6)$$

Вибір візуалізації у вигляді різних ізоліній може представляти для непідготовленого користувача складність, оскільки вимагає наявності спеціалізованих знань. З цієї причини в продукті, що розробляється для візуалізації гідродинамічних потоків необхідно завжди використовувати додаткове діалогове вікно. Воно повинно допомагати користувачеві у виборі типу ізолінії з однаковим чисельним значенням відображуваного параметра. Таке діалогове вікно може усунути неоднозначність трактування таких понять як: лінія струму, лінія завихореності, ізотакії, ізобара і ізотерма. Приклад такого діалогового вікна показаний на рисунку 4.26.



Рисунок 4.26 – Діалогове вікно для вибору ізоліній робочих параметрів

В деяких випадках при аналізі картин візуалізації течій отримання не чисельних, а тільки якісних результатів може також являти собою великий інтерес. У цьому випадку також дуже важливим питанням є правильний вибір визначального параметра процесу. Характерним прикладом такого випадку вибору характеристики для візуалізації потоку є світлотінньова візуалізація. Таке відображення АПД, детально описано в розділі 1.

Приклад світлотінньової візуалізації, яка може бути отримана при відтворенні рухомого потоку води через діафрагму є дуже наочним. Отримувані для цієї течії якісні результати можуть мати велике значення при проектуванні та подальшій експлуатації систем вентиляції або охолодження (повітрязбірники, вентиляційні решітки, теплообмінники поверхневого типу і т.і.). Схема такої течії показана на рисунку 4.27.

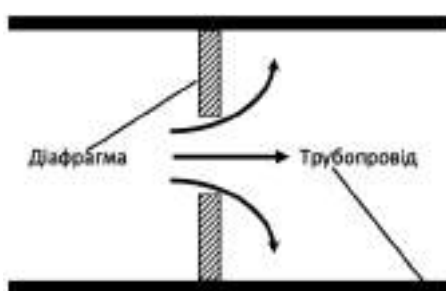


Рисунок 4.27 - Рух потоку через діафрагму

При проведенні досліджень візуалізація на основі сформованого масиву числових даних була виконана для середньої швидкості потоку, що дорівнює 70 см/с. Діаметр трубопроводу становив 0,1 м, внутрішній діаметр діафрагми становив 0,020 м. Довжина ділянки від діафрагми до початку труби була прийнята такою, що дорівнює 340 мм. Довжина ділянки від діафрагми до закінчення труби становила 270 мм. Приклад візуалізації ліній струму поблизу діафрагми показаний на рисунку 4.28. Він відповідає картині течії, яка була отримана через 50 секунд після початку руху потоку.

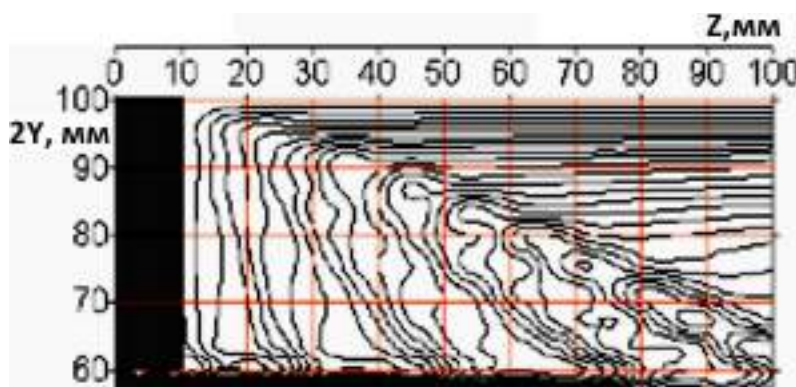


Рисунок 4.28 – Лінії струму поблизу стінок діафрагми

З точки зору інформаційних технологій якість такої візуалізації для звичайного користувача є дуже невисокою. Головною причиною є той факт, що в такому вигляді візуалізації остаточні результати можуть бути зрозумілі тільки тим фахівцям, які володіють відповідними знаннями гідромеханічних процесів.

Характерний вигин ліній струму, показаних на рис. 4.28 для фахівця з високим рівнем підготовки вказує на зменшення розмірів застійної області в рухомому потоці з ростом відстані від входу в діафрагму. Він також дозволяє зробити висновок про те, що застійна область є динамічно змінною структурою в потоці. Вона формується тільки після закінчення певного періоду часу. Ця часова ділянка стабілізації потоку залежить як від геометрії самого потоку, так і від його кінематичних характеристик.

У разі використання інформаційної технології фахівцем з невисоким рівнем підготовки набагато якісніше трактування результатів візуалізації може бути отримано при використанні звичайного светотеневого уявлення. Приклад такої візуалізації показаний на рисунку 4.29, де можна побачити яким чином в потоці розподілено поле напруг (механічних деформацій).

На рисунку 4.29 дуже добре видно, що максимум величини напруги (світла область) в потоці рідини проявляється в трикутній області поблизу тіла, тобто за бічною поверхнею діафрагми. Цікавим висновком, який також випливає з такої візуалізації є те, що ця величина завжди приймає свої

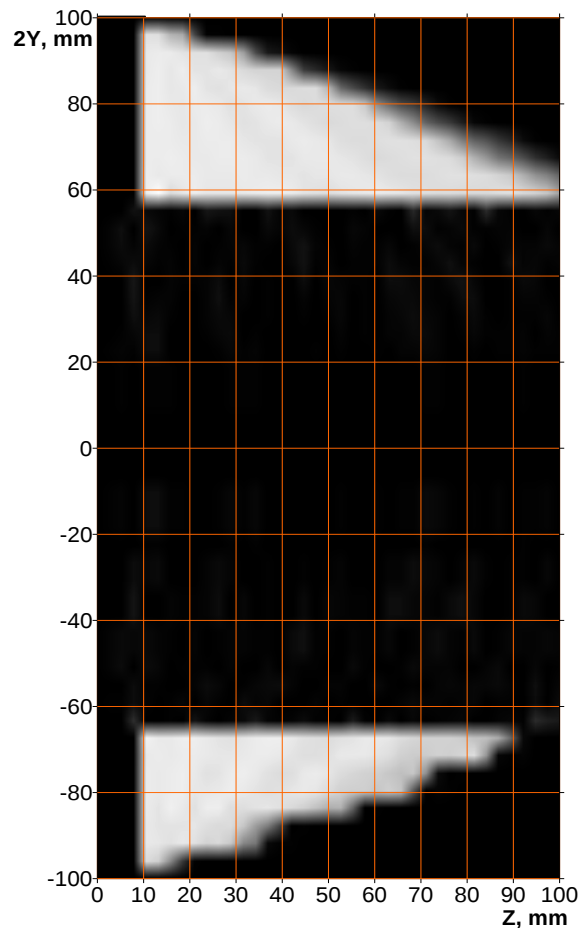


Рисунок 4.29 - Світло-тіньове відтворення поля напруженості в рухомому потоці за діафрагмою

максимальні значення на стінці тіла і в прилеглій частині вільного потоку, а не розподіляється на стінці трубопроводу, як можна було б припустити.

Інтенсивність світлового розподілу також дозволяє зробити користувачеві висновок про те, що в міру віддалення від діафрагми напруженість рушійного потоку зменшується.

Для порівняння якості роботи програмного комплексу з реальними характеристиками течії на прикладі задачі про рух потоку через діафрагму був виконаний розрахунок її коефіцієнта місцевих втрат.

Порівняння результатів, отриманих на підставі використання інформаційної технології і з використанням емпіричної формули (4.7) показані на рисунку 4.30. Розрахунок був виконаний на підставі усереднення характеристик поля швидкості і поля тиску до і після діафрагми Для порівняння

в якості еталону була взята напівемпірична формула Альтшуля [2], яка дозволяє розрахувати величину коефіцієнта місцевих втрат ζ тонкої діафрагми. Ця формула має вигляд

$$\zeta = \frac{25,2}{\varepsilon \cdot Re \cdot \left(\frac{S_T}{S_D}\right)^{\frac{3}{2}}} \quad (4.7)$$

де ε – коефіцієнт стиснення; S_T , S_D – площа поперечного перерізу трубопроводу і діафрагми, м^2 .

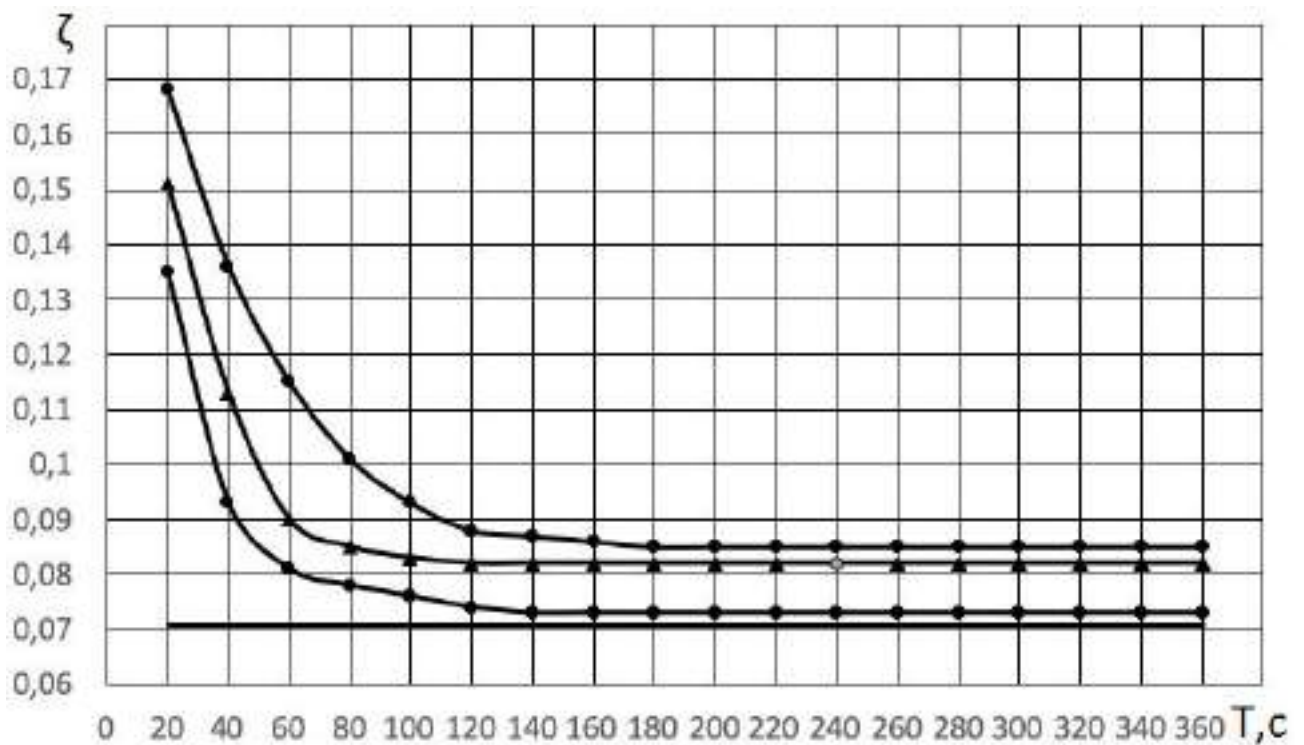


Рисунок 4.30 – Оцінка якості роботи інформаційної технології

- 1 - розрахунок з використанням рівнянь 2-го рівня складності;
- 2 - розрахунок з використанням рівнянь 3-го рівня складності;
- 3 - розрахунок з використанням рівнянь 4-го рівня складності;
- 4 - розрахунок за виразом (4.7).

Аналіз даних на чотирьох наведених графіках дозволяє зробити висновок, що така величина як втрати енергії в розробленої інформаційної технології на якісному і кількісному рівні відображена адекватно реальному процесу. Характер зміни перепаду тиску на діафрагмі і отримані чисельні значення відповідають емпіричним результатами. Відсутність повного збігу отриманих результатів викликано тільки недосконалістю емпіричної формули (4.7) оскільки при її застосуванні відсутні чіткі критерії для однозначного вибору величини коефіцієнта стиснення струменя. У цій формулі наявність числового коефіцієнта в чисельнику визначається тільки певним діапазоном швидкостей (чисел Рейнольдса) потоку, межі якого в роботі [2] також чітко не визначені.

4.4. Висновки по розділу 4

1. У момент формування початкового потоку даних комп'ютерна підтримка рішень одночасно з початком реального процесу вентиляції трюмів здійснює процесинг візуалізованою інформації. Цей процес є циклічним. При необхідності в будь-який момент часу він передбачає проведення коригування процесу моделювання з боку користувача.

2. Візуалізація на екрані користувача передбачає обов'язкове відображення чотирьох індикаторів:

- минулого часу з початку моменту інертизації вантажного трюму танкера;
- ступеня виконання процесу у відсотках;
- графіка, що демонструє рівень падіння концентрації кисню в обсязі трюму при його інертизації;
- графіка, що відображає чисельні значення розподілу концентрації кисню всередині трюму, отримані шляхом вимірювання та моделювання.

4. Архітектура розробленого програмного забезпечення для його роботи під час інертизації вантажних трюмів танкера базується на використанні дерева моделі з використанням стандартної деревовидної структури. Її побудова заснована на використанні всіх доступних образів візуалізації без використання закладок. Ця побудова є стандартною для використання на судні з будь-якою геометрією робочого простору трюму.

5. Для порівняльного аналізу результатів використання інформаційної технології для комп'ютерної підтримки рішень з даними реального гідродинамічного процесу необхідно спільно використовувати умову нерозривності потоку і критерій Куранта.

В роботі розробленого програмного забезпечення було встановлено, що:

- дисбаланс умови нерозривності потоку знаходиться в межах від $8 \cdot 10^{-6}$ до 10^{-16} . Такі малі значення похибки викликані "чисельної в'язкістю" процесора у використаному обчислювальному обладнанні, а не похибкою використаного методу візуалізації або роботи програмного комплексу;

- критерій Куранта в жодному розрахунковому вузлі протягом всієї роботи програмного комплексу не перевищить граничну величину рівну одиниці. Максимальне значення цього параметра становило величину $Cu=0,848$.

6. Використання в інформаційній технології для комп'ютерної підтримки рішень для потокової інформаційної обробки поточних результатів процесу заповнення вантажного трюму танкера інертними газами дозволило встановити, що отримані під час моделювання прогнозовані чисельні значення залишкової концентрації кисню, збігаються зі свідченнями газоаналізатора з похибкою, менш 1,7 %.

7. Наведено опис стандартних конструкцій діалогових вікон, які при використанні інформаційної технології для комп'ютерної підтримки рішень дозволяють користувачеві підвищити якість візуалізації робочих характеристик АПД без використання великих витрат потужності і ресурсів пам'яті використовуваного обчислювального обладнання.

ВИСНОВКИ

1. У першому розділі дисертаційної роботи проаналізовано існуючі системи підготовки вантажних операцій і особливості прийняття рішень при інертизації вантажних трюмів. Показано, що всі відомі інформаційні системи, які використовуються для підготовки вантажних операцій на танкерах не задовольняють вимогам щодо контролю за якістю поточних технологічних параметрів. Це призводить до невиправдано високих значень часу отримання інформації щодо безпечної концентрації кисню на основі аналізу АПД всередині трюму, що призводить, як наслідок, до невиправданого високого часу простоїв танкерів.

2. Проведено аналіз існуючого інформаційного забезпечення підтримки рішень та його основних складових – методів моделювання та візуалізації стану АПД всередині трюму довільної конфігурації при його інертизації. Показано, що існуючі методи моделювання та візуалізації АПД не в повній мірі забезпечують вимоги щодо забезпечення релевантності інформації для прийняття рішень в суднових системах інертизації вантажних трюмів, що призводить до високих часових витрат на здійснення процесу інертизації вантажних трюмів.

3. Розроблено математичну модель ізотермічного руху на малих швидкостях багатофазного потоку з перенесенням маси, що дозволило для процесу інертизації танкеру отримати нові наукові дані щодо розподілу застійних зон та робочих характеристик рухомого потоку за рахунок чого комп'ютерна підтримка рішень дає змогу ОПР (особа, що приймає рішення) приймати рішення щодо перебігу процесу та відсутності аварійних режимів на протязі роботи системи інертних газів.

4. Удосконалено модель обчислення АПД. Ця модель на відміну від існуючих оснований на розробленій багаторівневій класифікації моделей руху потоку рідини або газу на основі гідродинамічних рівнянь для визначення концентрації інертних газів в трюмі під час інертизації. Це дозволило отримати

інтегральні та локальні характеристики процесу інертизації трюмів танкеру для кількісного і якісного аналізу АПД.

5. Отримав подальший розвиток метод обчислення потокових даних на основі запропонованої їх чотирьохвимірної моделі, який полягає в розщепленні багатовимірному процесу на послідовність одновимірних, на підставі узагальненого принципу Гюйгенса–Адамара. Головною передумовою цього методу є той факт, що початковий процес руху рідини та систему рівнянь, що його описує можна розділити на сукупність більш простих процесів та систем рівнянь. Цей метод дозволив значно скоротити час моделювання процесу інертизації судна та забезпечити візуалізацію релевантної інформації для прийняття рішень щодо підготовки вантажних операцій на танкерах.

6. Запропоновано метод підтримки прийняття рішень при інертизації вантажних трюмів танкерів, який базується на використанні розробленої класифікації рівнів обчислювальної складності, удосконаленої моделі обчислення аеродинамічних потокових даних та методі їх обчислення, що дозволяє розробити інформаційну технологію для комп'ютерної підтримки рішень та дає можливість значно скоротити технологічний час процесу інертизації..

7. Використання в інформаційній технології для комп'ютерної підтримки рішень для потокової інформаційної обробки поточних результатів процесу заповнення вантажного трюму танкера інертними газами дозволило встановити, що отримані під час моделювання прогнозовані чисельні значення залишкової концентрації кисню, збігаються зі свідченнями газоаналізатора з похибкою, менш 1,7 %.

8. Наведено опис стандартних конструкцій діалогових вікон, які при використанні інформаційної технології для комп'ютерної підтримки рішень дозволяють користувачеві підвищити якість візуалізації робочих характеристик АПД без використання великих витрат потужності і ресурсів пам'яті використовуваного обчислювального обладнання.

9. Здійснені практичні випробування отриманих моделей, методів та інформаційної технології реалізовані в роботі судноплавної компанії офшорного флоту BOURBON Marine Services Greenmar (Додаток А) показали, що використання розробленого програмного забезпечення для комп'ютерної підтримки рішень дозволяє у порівнянні зі стандартною роботою системи інертних газів знижувати споживання палива, що використовується для виробництва інертних газів в залежності від конструкції судна з 14 до 43%.

Розроблені моделі кількісного та якісного аналізу потокових даних та метод підтримки рішень використовуються в навчальному процесі Одеського національного політехнічного університету для методичного забезпечення спеціальності 126 – інформаційні системи та технології під час викладання курсу лекцій і лабораторних робіт дисциплін: «Методи та системи підтримки прийняття рішень», «Системи підтримки прийняття рішень та прогнозування на основі сховищ даних», «Методи та технології обробки інформації».

Список використаної літератури

1. Алексеев А.К., Бондарев А.Е. Визуализация переноса погрешности при расчете поля течения // «Научная визуализация в прикладных задачах», Сб. науч. тр., Москва, МГУ, 2003, с.4-13.
2. Альтшуль А. Д. Гидравлические сопротивления. М.: Изд-во «Недра», 1970, 216 с.
3. Андерсон Д., Таннехилл Дж., Плетчер Р. Вычислительная гидромеханика и теплообмен: в 2-ч т. Т.1: Пер с англ. – М. Мир,: 1990 – 384 с., ил.
4. Арсирый, Е. А. Разработка подсистемы поддержки принятия решений в системах нейросетевого распознавания образов по статистической информации / Е. А. Арсирый, О. С. Маникаева, А. П. Василевска // Вост.-Европ. журн. передовых технологий. - 2015. - Т.6, № 4 (78). – С. 4-12
5. Базаров С.Б. Применение цифровой обработки изображений для визуализации результатов газодинамических расчетов // «Применение методов научной визуализации в прикладных задачах», Сб. науч. тр., Москва, МГУ, 2000, с.39-42.
6. Башта Т. М., С. С. Руднев. Гидравлика, гидромашины и гидроприводы. Учебник для машиностроительных вузов. – М.: Машиностроение, 1982. – 423 с.
7. Белозеров А.Ф. Оптические методы визуализации газовых потоков. Изд. Казанского гос.техн. ун-та. 2007. 747с.
8. Белов И. А., Исаев С. А., Коробков В.А. Задачи и методы расчета отрывных течений несжимаемой жидкости. –Л.: Судостроение. 1989. 254 с., ил.
9. Бондарев А.Е.. Анализ многомерных данных в задачах вычислительной газовой динамики. Научная визуализация, 2014. Кв. 4. Т. 6, № 5. С. 61–68.
10. Бондарев А.Е., Галактионов В.А., Чечеткин В.М. Анализ развития концепций и методов визуального представления данных в задачах

- вычислительной физики. Журнал вычислительной математики и математической физики, 2011, Т. 51, N 4, С. 669–683.
11. Бондарев А.Е., Галактионов В.А., Чечеткин В.М. Научная визуализация в задачах вычислительной механики жидкости и газа. Научная визуализация. № 4 1рїх 2010 1рїхС. 1-26
 12. Белоцерковский О.М. Численные методы в механике жидкостей. Под ред. Белоцерковского О. М. – М.: Мир., 1973. – 256 с.
 13. Бондарев А.Е. // Анализ многомерных данных в задачах вычислительной газовой динамики. – Научная визуализация. – 2014. – Квартал 4, Том 6, № 5. – С. 61–68.
 14. Ван–Дайк М. Альбом течений жидкости и газа. М.: Мир, 1986, 184 стр.
 15. Волков К.Н. // Методы визуализации вихревых течений в вычислительной газовой динамике и их применение при решении прикладных задач. – Научно–технический вестник информационных технологий, механики и оптики Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics, – 2014. – №3 (91). – С. 1 –10.
 16. Годштик М.А., Штерн В.Н., Яворский Н.И.. Вязкие течения с парадоксальными свойствами. – Новосибирск.: Наука, Сиб. Отд–ние, 1989. –336 с.
 17. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. М. Техносфера, 2005. – 1072 с.
 18. Гусейнов Д. А.,Спектор Ш.Ш., Вайнер Л.З. Технологические расчеты процессов переработки нефти. М. Химия. 1964 г.– 305 с.
 19. Электронный ресурс: <http://2i.su/fizika/01/information/1580.html>. По стану на 28.09.2019г.
 20. Библиотека OpenGL. Электронный ресурс: <https://www.opengl.org>. По стану на 8.01.2020 г.
 21. Электронный ресурс: <https://www.ansysadvantage.ru/ansys-cfx-and-icem-cfd-version-11-0/>. По стану на 9.01.2020 г.

22. Знаменская И.А. // Взаимодействие численной и экспериментальной визуализации потоков. – Научная визуализация. – 2013. – Квартал 3, Том 5, № 3. – С. 1–16.
23. Знаменская И.А., Гвоздева Л.Г., Знаменский Н.В. Методы визуализации в механике газа. – М.: МГАИ им. С. Орджоникидзе. 2001. – 57 с.
24. Знаменская И.А., Коротеева Е.Ю., Глазырин Ф.Н. Методы цифрового анализа изображений жидких и газоплазменных потоков на основе кросс–корреляционной обработки Научная визуализация, 2018, Т. 10, № 4, с. 111 – 119.
25. Знаменская И.А., Мурсенкова И.В., Дорощенко И.А. Высокоскоростная цифровая регистрация плазмо–газодинамических процессов в сверхзвуковых течениях в канале. Научная визуализация, 2019, том 11, номер 3, С. 54–63.
26. Избачков Ю. С. Информационные системы. Учебник для вузов / Ю. С Избачков, В. Н. Петров. – Питер, 2011. – 544 с.
27. Ковеня В. М., Яненко Н. Н. Метод расщепления в задачах газовой динамики. – Новосибирск: Наука. Сиб. отделение, 1981 – 304 с., ил.
28. Корн Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров. – М., 1984. 832 с.
29. Кравченко Т. К., Середенко Н. Н. Создание систем поддержки принятия решений: интеграция преимуществ отдельных подходов // Искусственный интеллект и принятие решений. 2012. No 1. С. 39 – 46.
30. Кутин В. А. Система визуализации программного комплекса FLOWVISION Научная визуализация, 2011, том 3, номер 1, С. 1–18.
31. Лаврентьев М.А. Проблемы гидродинамики и их математические модели: учеб. / М.А. Лаврентьев, Б.В. Шабат – М.: Наука, – 472 с.
32. Ладыженская О. А.. Математические вопросы динамики вязкой несжимаемой жидкости. Изд–во Наука. Гл. ред. физ. – мат. лит–ры. М. 1970. 288 с.

33. Ландау Л.Д. Гидродинамика: учеб. / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. – М.: Наука, 1988. – 736 с.
34. Ларичев О. И., Петровский А. В. Системы поддержки принятия решений. Современное состояние и перспективы их развития // Итоги науки и техники. Сер. «Техническая кибернетика». Т. 21. М.: ВИНТИ, 1987.
35. Лисецкий Ю.М.. СППР для выбора элементного базиса корпоративных интегрированных информационных систем. Математичні машини і системи, 2017, No 3& С. 23-37
36. Лойцянский Л. Г.. Механика жидкости и газа. Изд-во Наука. Гл. ред. физ. – мат. лит-ры. – М.: 1973. – 847 с.
37. Малахов А.В.. Гидромеханика ограниченных потоков: Монография. – Одесса: Астропринт, 1999. – 204 с.
38. Малахов А. В., Палагин А. Н., Гудилко Р. Г., Малахова Д. О. Изучение процесса разрушения движущихся воздушных каверн внутри заполненных балластных танков судов погружного типа SEMI-SUBMERSIBLE HEAVY-LIFT. *Матеріали науково технічної конференції «Річковий та морський флот експлуатація і ремонт»*. – м. Одеса, 2017. – С. 41 - 45.
39. Малахов А. В., Колегаев М.А., Бражник И. Д., Гудилко Р. Г., Малахова Д. О. Управление процессом вентиляции трюмов танкера. *Матеріали VIII Міжнародної науково-практичної конференції «Інформаційні управляючі системи і технології»*. – м. Одеса, 2019. – С. 232-234.
40. Малахов О. В., Маслов І. З., Гуділко Р. Г., Малахова Д. О. Особливості руху багатофазного газового струменя в змінному температурному полі. *Матеріали IX Міжнародна науково-практична конференція «Сучасні підходи до високоефективного використання засобів транспорту»*. – м. Ізмаїл, 2018. – С. 148-152.
41. Малахова Д.О. Інформаційні технології для контролю процесу вентиляції вантажних трюмів танкеру. Вчені записки Таврійського національного

- університету ім. В.І. Вернадського. Серія – Технічні науки. Т. 30 (69). № 5, 2019. С. 122-126.
42. Малахова Д. О. Классификация уравнений гидродинамики для использования в информационных технологиях при визуализации течений. Науковий вісник Херсонської державної морської академії. No 2 (21), 2019. С. 121-129.
 43. Малахова Д. О., Савельєва О. С. Програмний комплекс для застосування інформаційної технології на танкері. *Матеріали Науково-технічної конференції «Морський та річковий флот: експлуатація і ремонт»*. – м. Одеса, 2020. С. 191-199.
 44. Малоземов В.И., Певный А.Б. Полиномиальные сплайны: Учебное пособие. -Л.: Изд-во ЛГУ, 1986.- 120 с.
 45. Маркович Д.М., Токарев М.П., Бильский А.В. Адаптивные алгоритмы обработки изображений частиц для метода Particle Image Velocimetry // в монографии Современные оптические методы исследования потоков. Под ред. Б.С.Ринкевичуса. – М.: Оверлей. – 2009. – С.180-205.
 46. Маценко С.В. Грузовые операции на нефтяных танкерах: учебное пособие / С.В. Маценко, А.И. Кондратьев, Г.Г. Волков, В.Е. Борисов. – Новороссийск: МГА имени адмирала Ф.Ф.Ушакова, 2010. – 190 с.
 47. Міністерство інфраструктури України [Електронний ресурс]// Інформація про водний транспорт України - Режим доступу: <https://mtu.gov.ua/content/informaciya-pro-vodniy-transport-ukraini.html>
 48. Ньюмен Дж.. Морская гидродинамика: Пер. с англ. — Л.: Судостроение, 1985. — 368 с.
 49. Павлов И.Н., Ринкевичюс Б.С., Толкачев А.В., Ведяшкина А.В. // Возможности метода поверхностного плазмонного резонанса для визуализации физических процессов в наноразмерных пограничных слоях жидкости. – Научная визуализация. – 2017. – Квартал 1, Том 9, № 1. – С. 41–49.

50. Пархотько А.В. Вплив інтеграції в інформаційну систему на ділянці вантаження-розвантаження порту на час стоянки судна. Вісник східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля - № 1 (218) 2015& - с.126-129
51. Пейре Р., Тейлор Д. Вычислительные методы в задачах механики жидкости. Пер. с англ. – Л.: Гидрометеиздат, 1986 – 352 с., ил.
52. Петерсон В.Л. // Требования к суперЭВМ в избранных дисциплинах, представляющих интерес для аэрокосмонавтики/ В. Л. Петерсон, Дж. Ким, Т. Л. Холст и др. *ТИИЭР: Пер. с англ.*, 1989, т.77, № 7, с. 66–84. – Supercomputers requirements for selected disciplines important to aerospace./ V. L. Peterson, J. Kim, T. L. Holst et al. *Proc. Of the IEEE*, 1989, vol. 77, N.7, p.1038 – 1055.
53. Савельєва О. С. Малахова Д. О. Застосування інформаційних технологій у суднових технологічних процесах. Суднові енергетичні установки. Науковий-технічний збірник. № 39, 2019. С. 78-88.
54. Савельєва О. С., Малахова Д. О. Методологія візуалізації гідродинамічних потоків. *Матеріали V Українсько-німецької конференції «Інформатика. Культура. Техніка»*. – м. Одеса, 2017. – С. 117 - 118.
55. Савельєва О. С., Становська І. І., Гур'єв І. М., Малахова Д. О., Саух І. А. Інформаційні технології управління проектною логістикою за допомогою віртуальних моделей. *Матеріали IV Міжнародної науково-практичної конференції «Summer InfoCom Advanced Solutions»*. – м. Київ, 2017. – С. 43 - 44.
56. Савельєва О. С., Малахова Д. О. Методи побудови графічних образів поля швидкості і тиску при проведенні гідродинамічних розрахунків. *Матеріали VI Українсько-німецької конференції «Інформатика. Культура. Техніка»*. – м. Одеса, 2018. – С. 98-99.
57. Савельєва О. В., Герганов М. Л., Малахова Д. О. Інформаційна технологія моделювання псевдовільних потоків крізь порувате середовище. *Моделювання в прикладних наукових дослідженнях.: Матеріали XXVII*

- семінару Одеського національного політехного університету. – м. Одеса, 2019. – 2019. – С. 15-17.*
58. Седов Л. И. Методы подобия и размерности в механике. Изд-во Наука. Гл. ред. физ. – мат. лит-ры. М. 1965. 386 с.
 59. Тиханычев О.В. Теория и практика автоматизации поддержки принятия решений. – М.: Эдытус, 2018. – 76 с.
 60. Трахтенгерц Э. А., “Компьютерные системы поддержки принятия управленческих решений”, Пробл. управл., 2003, № 1, 13–28
 61. Шакиров В. А., Панкратьев П. С. Поддержка принятия решений на стадии предпроектных исследований на основе двухуровневого многокритериального анализа // Прикладная информатика. 2013. № 6 (48). С. 111 – 121.
 62. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя: Пер. с нем. –М.: Наука, 1974. 711 с.
 63. Яненко Н. Н. Метод дробных шагов решения многомерных задач математической физики. – Новосибирск: Наука, Сиб. отделение, 1967. 195 с.
 64. Adrian R. J. Twenty years of particle image velocimetry. Experiments in Fluids, 2005, 39: 159–69.
 65. Afendikov A.L., Khankhasaeva Ya.V., Lusky A.E., Menshov I.S., Merkulov K.D. // Computation and visualization of flows past bodies in mutual motion. – Scientific Visualization. – 2016. – Quarter 4, Vol 8, № 4. – P. 128–138.
 66. Banks D.C., Singer B.A. Predictor-corrector technique for visualizing unsteady flow // IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics. 1995. V. 1. N 2. P. 151-163.
 67. Bertalmio M., Bertozzi A.L., Sapiro G. Navier–Stokes, fluid dynamics and image and video inpainting. Proceedings of the 2001 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. CVPR 2001. Kauai, HI, volume I, pp. I–355–I362.
 68. Cano, Alejandro. (2005). Decision support tools for environmentally conscious chemical process design.

69. Childs H. et al., "A contract based system for large data visualization," VIS 05. IEEE Visualization, 2005., Minneapolis, MN, 2005, pp. 191-198.
70. Cizman, Anton & Urh, Marko. (2006). A PC-based Decision Support System for Optimal Cutting of Logs in Veneers Production.. Informatica (Slovenia). 30. 213-220.
71. Eeles P., Cripps P. The Process of Software Architecting. Pearson Education. 2009. Режим доступа: https://books.google.com.ua/books?id=j1LYCrn_Lx0C&printsec=frontcover&hl=ru&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false
72. Erdogan, Gencer & Refsdal, Atle & Nygård, Bjørn & Rosland, Ole & Randeberg, Bernt. (2018). Risk-Based Decision Support Model for Offshore Installations. Business Systems Research Journal. 9. 55-68. 10.2478/bsrj-2018-0019.
73. Fairbanks G. Just Enough Software Architecture: A Risk-Driven Approach. Marshall & Brainerd. 2012. Режим доступа: https://books.google.com.ua/books?id=5UZ-AQAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=ru&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false
74. Farag, Yasser Bayoumy Abdelwahab, "A decision support system for ship's energy efficient operation: based on artificial neural network method" (2017). World Maritime University Dissertations. 549.
75. Fry B. Visualizing Data: Exploring and Explaining Data with the Processing Environment. O'Reilly Media, Inc. 2007. Режим доступа: https://books.google.com.ua/books?id=6jsVAiULQBgC&printsec=frontcover&hl=ru&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false
76. Garth C., Krishnan H., Tricoche X., Bobach T., Joy K.I. Generation of accurate integral surfaces in time-dependent vector fields // IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics. 2008. V. 14. N 6. P. 1404-1411.
77. Haller G. An objective definition of a vortex // Journal of Fluid Mechanics. 2005. V. 525. P. 1-26.

78. Humberto Cervantes, Rick Kazman “Designing Software Architectures: A Practical Approach” Addison-Wesley Professional. 2016. Режим доступа: https://books.google.com.ua/books?id=G30JDAAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=ru&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false
79. Iakobovski M., Nesterov I., Krinov P. Large distributed datasets visualization software, progress and opportunities // Computer Graphics & Geometry, 2007, Vol. 9, N 2, pp. 1-19.
80. Jiang M., Machiraju R., Thompson D. Detection and visualization of vortices // Visualization Handbook. Burlington: Elsevier, 2005. P. 295-309.
81. John Reekie, R. J. Mcadam, Rohan McAdam “A Software Architecture Primer”. Angophora Press. 2006. Режим доступа: https://books.google.com.ua/books?id=pCW2ZWUhKkQC&printsec=frontcover&hl=ru&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false
82. Jonathan A. Dell “Digital Interface Design and Application”. John Wiley & Sons. 2015. Режим доступа: https://books.google.com.ua/books?id=8UExBwAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=ru&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false
83. Kapadia M., Wang M., Singh S., Reinman G., Faloutsos P. Scenario Space: Characterizing Coverage, Quality, and Failure of Steering Algorithms. The Eurographics Association 2011. - Режим доступа: <https://www.researchgate.net/publication/220789298>
84. Kim, Youn-Tae & Baek, Gyeong-Dong & Jeon, Tae-Ryong & Kim, Sung-Shin. (2008). Smart Cargo Monitoring System Based on Decision Support System for Liquid Carrier Tanker. International Journal of Fuzzy Logic and Intelligent Systems. 8. - pp. 140-145.
85. Krishnan H., Garth C., Joy K.I. Time and streak surfaces for flow visualization in large time-varying data sets // IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics. 2009. V. 15. N 6. Art. N5290738. P. 1267-1274.
86. Kutin V.A. Visualization System of CFD Software Flowvision. Scientific Visualization: Vol. 3, #1. 2011. P. 1-18.

87. Len Bass, Paul Clements, Rick Kazman «Software Architecture in Practice». 2nd ed. Addison-Wesley Professional. 2003. Режим доступа: https://books.google.com.ua/books?id=ZY6UZTjBnGQC&printsec=frontcover&hl=ru&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false
88. Levy Y., Degani D., Seginer A. Graphical visualization of vortical flows by means of helicity // AIAA Journal. 1990. V. 28. N 8. P. 1347-1352.
89. Ma Kwan-Liu «Visualizing Visualizations» IEEE Computer Graphics and Applications, v.20, N 5, 2000, p.16 - 19.
90. Malakhov O., Kolegaev M., Malakhova D., Maslov I., Brazhnik I., Gudilko R. // Improvement of working parameters of ships with the use of water–fuel emulsions. – Technology audit and production reserves. – 2018. – Vol 6, N 3(44). Chemical engineering. – P. 14–20.
91. Malakhov Oleksiy V., Kolegaev Mikhail O., Brazhnik Igor D., Saveleva Oksana S., Malakhova Diana O. New Forced Ventilation Technology for Inert Gas System on Tankers. International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE), Volume-9 Issue-4, February 2020. pp. 2549-2555.
92. Mar-Ortiz, Julio & Gracia, Maria & Castillo-García, Norberto. (2018). Challenges in the Design of Decision Support Systems for Port and Maritime Supply Chains. 10.1007/978-3-319-74002-7_3.
93. Mebarki A., Alliez P., Devillers O. Farthest point seeding for efficient placement of streamlines // Proceedings of IEEE Visualization Conference. 2005. Art. N 1566043. P. 61.
94. Merzkirch W. Flow Visualization. Elsevier. 2012. Режим доступа: https://books.google.com.ua/books?id=qOTDzNtik0kC&printsec=frontcover&hl=ru&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false
95. Meier, .G. Computerized background-oriented schlieren. Exp Fluids 33. 2002. P. 181–187.

96. Möller Torsten, Hamann Bernd, Russell Robert D. (Eds.) «Mathematical Foundations of Scientific Visualization, Computer Graphics, and Massive Data Exploration». Springer. 2009.
97. Nakahashi K. Aeronautical CFD in the age of petaflops-scale computing: from unstructured to Cartesian meshes // European Journal of Mechanics. B/Fluids. 2013. V. 40. P. 75-86.
98. Pascal Picart, Jun-chang Li. Digital Holography. John Wiley & Sons, 358 p. 2013.
99. Patomtummakan, Jakkawan & Nananukul, Narameth. (2017). Air Cargo Decision Support System. Information (ISSN 13434500). 20. 2405-2416.
100. Pereira-Barretto, Marcos & Cruz, Roberto & Mendes, André & Seixas, Michel & Cunha, Claudio & Brinati, Marco. (2013). A Decision Support System for Allocating General Cargo in Platform Supply Vessels. Proceedings of the Annual Offshore Technology Conference. 2. 10.4043/24433-MS.
101. Power, Daniel J., "Decision Support Systems: Concepts and Resources for Managers" (2002). Faculty Book Gallery. 67.
102. Preusser T., Rumpf M., Telea A. Flow Visualization via Partial Differential Equations // Mathematical Foundations of Scientific Visualization, Computer Graphics, and Massive Data Exploration, Ed. by Möller T., Hamann B., Russell R., Springer-Verlag, 2009, pp.157-190.
103. Rozanski N., Woods E. Software Systems Architecture: Working with Stakeholders Using Viewpoints and Perspectives. 2nd ed. Addison-Wesley. 2011. Режим доступа:
https://books.google.com.ua/books?id=ka4QO9kXQFUC&printsec=frontcover&hl=ru&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false
104. Schulz H., Simoes A., Lobosco R. Hydrodynamics: Optimizing Methods and Tools. Books on Demand. 2011. Режим доступа:
https://books.google.com.ua/books?id=TdCPDwAAQBAJ&pg=PR13&dq=Hydrodynamics:+Optimizing+Methods+and+Tools+book&hl=ru&sa=X&ved=0ahUKewijl_jTkpXpAhUklYsKHQIeDIQQ6AEIKDAA#v=onepage&q=Hydrodynamics%3A%20Optimizing%20Methods%20and%20Tools%20book&f=false

105. Settles G.S. Schlieren and Shadowgraph Techniques. Visualizing Phenomena in Transparent Media. Springer. 2006.
106. Settles G.S. Schlieren and Shadowgraph Techniques: Visualizing Phenomena in Transparent Media. Springer Science & Business Media. 2001. Режим доступа: https://books.google.com.ua/books?id=HWtB2R0gWFgC&printsec=frontcover&hl=ru&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false
107. Shen H.-W., Kao D.L. A new line integral convolution algorithm for visualizing time-varying flow fields // IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics. 1998. V. 4. N 2. P. 98-108.
108. Skjong, Stian & Kyllingstad, Lars & Reite, Karl-Johan & Haugen, Joakim & Ladstein, Jarle & Aarsæther, Karl. (2019). Generic On-Board Decision Support System Framework for Marine Operations. 10.1115/OMAE2019-95146.
109. Smits A. J., Lim T.T. “Flow Visualization: Techniques and Examples”. (2nd Edition)”. Imperial College Press. 2012, p. 444 Режим доступа: https://books.google.com.ua/books?id=WDW6CgAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=ru&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false
110. Theisel H., Weinkauff T., Hege H.-C., Seidel H.-P. Topological methods for 2D time-dependent vector fields based on stream lines and path lines // IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics. 2005. V. 11. N 4. P. 383-394.
111. Tilak Mitra “Practical Software Architecture: Moving from System Context to Deployment”. IBM Press. 2015. Режим доступа: https://books.google.com.ua/books?id=EbbxCgAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=ru&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false
112. Tricoche X., Garth C. Topological Methods for Visualizing Vortical Flows // Mathematical Foundations of Scientific Visualization, Computer Graphics, and Massive Data Exploration, Ed. by Möller T., Hamann B., Russell R., Springer-Verlag, 2009, pp.89-108.
113. Tomas M. Turner, Fundamentals of hydraulic dredging, – 2nd ed. ASCE Press: Reston, Virginia, 1996, pp. 258.

114. Tomomasa Uemura, Yoshiaki Ueda, Manabu Iguchi “Flow Visualization in Materials Processing: Practical Techniques and Selected Applications”. Springer. 2017. Режим доступа: https://books.google.com.ua/books/about/Flow_Visualization_in_Materials_Processi.html?id=lbM4DwAAQBAJ&source=kp_cover&redir_esc=y
115. Ware C. Information Visualization: Perception for Design. Elsevier. 2012. Режим доступа: https://books.google.com.ua/books/about/Information_Visualization.html?id=UpYCSS6snnAC&source=kp_cover&redir_esc=y
116. Watson, Hugh. (2017). Preparing for the cognitive generation of decision support. MIS Quarterly Executive. 16. 153-169.
117. Winter G, Periaux J, Fox P, A. Ecer, N. Satofuka «Parallel Computational Fluid Dynamics: Multidisciplinary Applications». Elsevier. 2005. Режим доступа: https://books.google.com.ua/books?id=7Hfxurz83ZgC&printsec=frontcover&dq=Hydrodynamics:+Optimizing+Methods+and+Tools+book&hl=ru&sa=X&ved=0ahUKEwiji_jTkpXpAhUklYsKHQIeDIQQ6AEIOzAC#v=onepage&q&f=false
118. Zakharova A. A., Vekhter E.V., Shklyar A.V., Pak A. J. «Visual modeling in an analysis of multidimensional data», Journal of Physics: Conference Series, Vol. 944, Issue 1,- 012127, 2018.
119. Znamenskaya I.A., Kuli-zade T.A., Kulikov V.N., Perminov S.P. Transonic 3D Non-stationary Flow Visualization Using Pulse Transversal Discharge. Journal of Flow Visualization and Image Processing, Begell House (United States), V 18, № 3, P. 215-224.

8. ДОДАТКИ

ДОДАТОК А.

Акт впровадження результатів дослідження
в роботу судноплавної компанії
Bourbon Marine Services Greenmar



To whom it may concern.

ACT

On implementation of scientific research results of the Diana Malakhova's PhD thesis on the BOURBON Marine Services Greenmar company fleet of marine vessels.

The trial-software was supplied by Diana Malakhova free of charge for service on vessels used for oil processing, which was done in order to check the possibility of using the investigation results based on the new information technology for Inert Gas System.

Fuel tracking and consumption specialists found the following:

- forced inertization in comparison with standard work of IG System enables to decrease the fuel consumption for IG System depending on vessel's construction from 14 up to 43 %;
- the information technology developed for IG System operation provides the indication of real time current parameters of IG System operation;
- software for IG System operation can be used in combination with standard set of gas analyzers, thermometer and pressure gauges operating on the base of HART protocol.

Functional Analyst Coordinator  Aurélie Renavand

Installation Engineer (M/F)  Christopher Louvet



Bourbon Marine Services Greenmar, a BOURBON company

Registered office: IFS Court, Bank Street, TwentyEight Cybercity, Ebène 72201, Republic of Mauritius

Private Company limited by shares N°111209 – C2/GBL – Republic of Mauritius

Переклад акту на українську мову:

За місцем вимоги

АКТ

Про впровадження результатів наукових досліджень PhD дисертації Діани Малахової на флоті морських суден компанії Бурбон Марін Сервіс Грінмар.

Для роботи на суднах, що використовуються для видобутку нафти, пробне програмне забезпечення було дано Діаною Малаховою на безкоштовній основі. Це було зроблено з метою перевірки можливості використання результатів досліджень, що базуються на новітній інформаційній технології для системи інертних газів.

Фахівцями з обліку палива та аналізу його споживання було встановлено, що:

- примусова інертизація у порівнянні зі стандартною роботою системи інертних газів дає можливість знизити споживання палива для системи інертних газів в залежності від конструкції судна з 14 до 43%;
- розроблена інформаційна технологія для експлуатації системи інертних газів відображає в реальному часі поточні параметри роботи системи інертних газів;
- програмне забезпечення для системи інертних газів може бути використано в комбінації зі стандартними газоаналізаторами, термометрами і датчиками тиску, що працюють на базі HART протоколу.

Координатор функціональної аналітики (Підпис)

Інженер з монтажу (Підпис)

ДОДАТОК Б.

Акт про впровадження в навчальний процес
результатів дисертаційної роботи

ЗАТВЕРДЖУЮ
Проректор за науково-педагогічної
Та виховної роботи Одеського
Національного політехнічного
Університету

 Нестеранко Є.А.
« 2 » грудня 2020р.



АКТ

Про впровадження в навчальний процес результатів дисертаційної роботи
за темою «Моделі та методи комп'ютерної підтримки рішень в інформаційних
системах підготовки вантажних операцій на танкерах» на здобуття наукового
ступеня доктора філософії

за спеціальністю: 122 «Комп'ютерні науки»
(галузь знань: 12 – Інформаційні технології)

Малахової Діани Олегівни

Комісія у складі завідувача кафедри інформаційних технологій, професора, д.т.н. Вичужаніна В.В., доцента, к.т.н., доцента кафедри інформаційних технологій Козлова А.Ю. склали цей акт про те, що у Одеському національному політехнічному університеті, при викладанні дисциплін «Методи та системи підтримки прийняття рішень», «Системи підтримки прийняття рішень та прогнозування на основі сховищ даних», «Методи та технології обробки інформації» використовувались наступні оригінальні матеріали, які отримано у дисертаційній роботі Малахової Д.О., а саме: моделі кількісного та якісного аналізу потокових даних; метод підтримки прийняття рішень, який базується на використанні розробленої класифікації потокових даних.

Завідувач кафедри,
д.т.н., професор.

 В.В. Вичужанін

Доцент кафедри,
к.т.н., доцент

 А.Ю. Козлов

ДОДАТОК В.

Розрахунковий блок програмного комплексу для моделювання
руху обмеженого потоку рідини з використанням з
використанням методу розщеплення для вирішення
рівнянь 4 рівня складності

```


//*** 5 Блок расчета скорости и давления в текущий момент времени ***//
St:= Format('Time = %d',[0]);
TextOut(DC,10,130,PChar(St),Length(St));
for t:=3 to Zt do
begin
  St:= Format('T = %d',[t]);
  TextOut(DC,10,110,PChar(St),Length(St));
  Timer2:=Time;
  a:=Timer2-Timer1;
  S:=TimeToStr(a);
  TextOut(DC,63,130,PChar(S),Length(S));
  St:= IntToStr(t);
  TextOut(DC,185,180,PChar(St),Length(St));
  for k:=0 to Zc do
    begin
      for i:=0 to N do
        begin
          for j:=0 to NumberOfCirclePoints[i]-1 do
            begin
              // 3 система уравнений - движение по координате Z
            if k=0 then
              begin
                dVx1dZ:=(-3*Vx[i,j,k,2]+4*Vx[i,j,k+1,2]-Vx[i,j,k+2,2])/((Z[k+2]-
                Z[k+1])+(Z[k+1]-Z[k]));
                dVy1dZ:=(-3*Vy[i,j,k,2]+4*Vy[i,j,k+1,2]-Vy[i,j,k+2,2])/((Z[k+2]-
                Z[k+1])+(Z[k+1]-Z[k]));
                dVz1dZ:=(-3*Vz[i,j,k,2]+4*Vz[i,j,k+1,2]-Vz[i,j,k+2,2])/((Z[k+2]-
                Z[k+1])+(Z[k+1]-Z[k]));
                d2VxdZ2:=(-Vx[i,j,k+3,2]+4*Vx[i,j,k+2,2]-
                5*Vx[i,j,k+1,2]+2*Vx[i,j,k,2])/((Z[k+3]-Z[k+2])*(Z[k+1]-Z[k]));
                d2VydZ2:=(-Vy[i,j,k+3,2]+4*Vy[i,j,k+2,2]-
                5*Vy[i,j,k+1,2]+2*Vy[i,j,k,2])/((Z[k+3]-Z[k+2])*(Z[k+1]-Z[k]));
                d2VzdZ2:=(-Vz[i,j,k+3,2]+4*Vz[i,j,k+2,2]-
                5*Vz[i,j,k+1,2]+2*Vz[i,j,k,2])/((Z[k+3]-Z[k+2])*(Z[k+1]-Z[k]));
              end;
            if ((k>=1) and (k<=Zc-1)) then
              begin
                dVx1dZ:=(Vx[i,j,k+1,2]-Vx[i,j,k-1,2])/((Z[k+1]-Z[k])+(Z[k]-Z[k-1]));
                dVy1dZ:=(Vy[i,j,k+1,2]-Vy[i,j,k-1,2])/((Z[k+1]-Z[k])+(Z[k]-Z[k-1]));
                dVz1dZ:=(Vz[i,j,k+1,2]-Vz[i,j,k-1,2])/((Z[k+1]-Z[k])+(Z[k]-Z[k-1]));
                d2VxdZ2:=(Vx[i,j,k+1,2]-2*Vx[i,j,k,2]+Vx[i,j,k-1,2])/((Z[k+1]-Z[k])*(Z[k]-
                Z[k-1]));
                d2VydZ2:=(Vy[i,j,k+1,2]-2*Vy[i,j,k,2]+Vy[i,j,k-1,2])/((Z[k+1]-Z[k])*(Z[k]-
                Z[k-1]));
                d2VzdZ2:=(Vz[i,j,k+1,2]-2*Vz[i,j,k,2]+Vz[i,j,k-1,2])/((Z[k+1]-Z[k])*(Z[k]-
                Z[k-1]));
              end;
            if k=Zc then
              begin
                dVx1dZ:=(3*Vx[i,j,k,2]-4*Vx[i,j,k-1,2]+Vx[i,j,k-2,2])/((Z[k]-Z[k-1])+(Z[k-
                1]-Z[k-2]));
                dVy1dZ:=(3*Vy[i,j,k,2]-4*Vy[i,j,k-1,2]+Vy[i,j,k-2,2])/((Z[k]-Z[k-1])+(Z[k-
                1]-Z[k-2]));
                dVz1dZ:=(3*Vz[i,j,k,2]-4*Vz[i,j,k-1,2]+Vz[i,j,k-2,2])/((Z[k]-Z[k-1])+(Z[k-
                1]-Z[k-2]));
                d2VxdZ2:=(2*Vx[i,j,k,2]-5*Vx[i,j,k-1,2]+4*Vx[i,j,k-2,2]-Vx[i,j,k-
                3,2])/((Z[k]-Z[k-1])*(Z[k-2]-Z[k-3]));
                d2VydZ2:=(2*Vy[i,j,k,2]-5*Vy[i,j,k-1,2]+4*Vy[i,j,k-2,2]-Vy[i,j,k-
                3,2])/((Z[k]-Z[k-1])*(Z[k-2]-Z[k-3]));
                d2VzdZ2:=(2*Vz[i,j,k,2]-5*Vz[i,j,k-1,2]+4*Vz[i,j,k-2,2]-Vz[i,j,k-
                3,2])/((Z[k]-Z[k-1])*(Z[k-2]-Z[k-3]));
              end;
            end;
          end;
        end;
      end;
    end;
  end;
end;


```

```

end;
if ((i<=N-1) and (j=0) and (i<>0)) then
begin
  A:=Abs(Abs(Y[i,j+1])-Abs(Y[i,j]));
  B:=Abs(Abs(Y[i,j+2])-Abs(Y[i,j+1]));
  C:=A+B;
  if ((A<10e-10) and (X[i,j+1]<10e-10) and (X[i,j]>0)) then
    C:=A+B;
  if ((A<10e-10) and (X[i,j+1]>0) and (X[i,j]<10e-10)) then
    C:=A+B;
  if ((B<10e-10) and (X[i,j+2]<10e-10) and (X[i,j+1]>0)) then
    C:=A+B;
  if ((B<10e-10) and (X[i,j+2]>0) and (X[i,j+1]<10e-10)) then
    C:=A+B;
  if ((A<10e-10) and (Y[i,j+1]<10e-10) and (Y[i,j]>0)) then
    C:=2*Y[i,j]+B;
  if ((A<10e-10) and (Y[i,j+1]>0) and (Y[i,j]<10e-10)) then
    C:=2*Y[i,j+1]+B;
  if ((B<10e-10) and (Y[i,j+2]<10e-10) and (Y[i,j+1]>0)) then
    C:=A+2*Y[i,j+1];
  if ((B<10e-10) and (Y[i,j+2]>0) and (Y[i,j+1]<10e-10)) then
    C:=A+2*Y[i,j+2];
  dVx1dY:=(-3*Vx[i,j,k,2]+4*Vx[i,j+1,k,2]-Vx[i,j+2,k,2])/C;
  dVy1dY:=(-3*Vy[i,j,k,2]+4*Vy[i,j+1,k,2]-Vy[i,j+2,k,2])/C;
  dVz1dY:=(-3*Vz[i,j,k,2]+4*Vz[i,j+1,k,2]-Vz[i,j+2,k,2])/C;
  A:=Abs(Abs(Y[i,j+3])-Abs(Y[i,j+2]));
  B:=Abs(Abs(Y[i,j+1])-Abs(Y[i,j]));
  C:=A*B;
  if ((A<10e-10) and (X[i,j+3]<10e-10) and (X[i,j+2]>0)) then
    C:=B;
  if ((A<10e-10) and (X[i,j+3]>0) and (X[i,j+2]<10e-10)) then
    C:=B;
  if ((B<10e-10) and (X[i,j+1]<10e-10) and (X[i,j]>0)) then
    C:=A;
  if ((B<10e-10) and (X[i,j+1]>0) and (X[i,j]<10e-10)) then
    C:=A;
  if ((A<10e-10) and (Y[i,j+3]<10e-10) and (Y[i,j+2]>0)) then
    C:=2*Y[i,j+2]*B;
  if ((A<10e-10) and (Y[i,j+3]>0) and (Y[i,j+2]<10e-10)) then
    C:=2*Y[i,j+3]*B;
  if ((B<10e-10) and (Y[i,j+1]<10e-10) and (Y[i,j]>0)) then
    C:=A+2*Y[i,j];
  if ((B<10e-10) and (Y[i,j+1]>0) and (Y[i,j]<10e-10)) then
    C:=A+2*Y[i,j+1];
  d2VxdY2:=(-Vx[i,j+3,k,2]+4*Vx[i,j+2,k,2]-5*Vx[i,j+1,k,2])+2*Vx[i,j,k,2]/C;
  d2VydY2:=(-Vy[i,j+3,k,2]+4*Vy[i,j+2,k,2]-5*Vy[i,j+1,k,2])+2*Vy[i,j,k,2]/C;
  d2VzdY2:=(-Vz[i,j+3,k,2]+4*Vz[i,j+2,k,2]-5*Vz[i,j+1,k,2])+2*Vz[i,j,k,2]/C;
end;
if ((i<=N-1) and (j>=1) and (j<=NumberOfCirclePoints[i]-1) and (i<>0)) then
begin
  A:=Abs(Abs(Y[i,j+1])-Abs(Y[i,j]));
  B:=Abs(Abs(Y[i,j])-Abs(Y[i,j-1]));
  C:=A+B;
  if ((A<10e-10) and (X[i,j+1]<10e-10) and (X[i,j]>0)) then
    C:=A+B;
  if ((A<10e-10) and (X[i,j+1]>0) and (X[i,j]<10e-10)) then
    C:=A+B;
  if ((B<10e-10) and (X[i,j]<10e-10) and (X[i,j-1]>0)) then
    C:=A+B;
  if ((B<10e-10) and (X[i,j]>0) and (X[i,j-1]<10e-10)) then
    C:=A+B;

```

```

if ((A<10e-10) and (Y[i,j+1]<10e-10) and (Y[i,j]>0)) then
  C:=2*Y[i,j]+B;
if ((A<10e-10) and (Y[i,j+1]>0) and (Y[i,j]<10e-10)) then
  C:=2*Y[i,j+1]+B;
if ((B<10e-10) and (Y[i,j]<10e-10) and (Y[i,j-1]>0)) then
  C:=A+2*Y[i,j-1];
if ((B<10e-10) and (Y[i,j]>0) and (Y[i,j-1]<10e-10)) then
  C:=A+2*Y[i,j];
dVx1dY:=(Vx[i,j+1,k,2]-Vx[i,j-1,k,2])/C;
dVy1dY:=(Vy[i,j+1,k,2]-Vy[i,j-1,k,2])/C;
dVz1dY:=(Vz[i,j+1,k,2]-Vz[i,j-1,k,2])/C;
A:=Abs(Abs(Y[i,j+1])-Abs(Y[i,j]));
B:=Abs(Abs(Y[i,j])-Abs(Y[i,j-1]));
C:=A*B;
if ((A<10e-10) and (X[i,j+1]<10e-10) and (X[i,j]>0)) then
  C:=B;
if ((A<10e-10) and (X[i,j+1]>0) and (X[i,j]<10e-10)) then
  C:=B;
if ((B<10e-10) and (X[i,j]<10e-10) and (X[i,j-1]>0)) then
  C:=A;
if ((B<10e-10) and (X[i,j]>0) and (X[i,j-1]<10e-10)) then
  C:=A;
if ((A<10e-10) and (Y[i,j+1]<10e-10) and (Y[i,j]>0)) then
  C:=2*Y[i,j]*B;
if ((A<10e-10) and (Y[i,j+1]>0) and (Y[i,j]<10e-10)) then
  C:=2*Y[i,j+1]*B;
if ((B<10e-10) and (Y[i,j]<10e-10) and (Y[i,j-1]>0)) then
  C:=A+2*Y[i,j-1];
if ((B<10e-10) and (Y[i,j]>0) and (Y[i,j-1]<10e-10)) then
  C:=A+2*Y[i,j];
d2VxdY2:=(Vx[i,j+1,k,2]-2*Vx[i,j,k,2]+Vx[i,j-1,k,2])/C;
d2Vydy2:=(Vy[i,j+1,k,2]-2*Vy[i,j,k,2]+Vy[i,j-1,k,2])/C;
d2Vzdy2:=(Vz[i,j+1,k,2]-2*Vz[i,j,k,2]+Vz[i,j-1,k,2])/C;
end;
if ((i<=N) and (j=NumberOfCirclePoints[i])) then
begin
  A:=Abs(Abs(Y[i,j])-Abs(Y[i,j-1]));
  B:=Abs(Abs(Y[i,j-1])-Abs(Y[i,j-2]));
  C:=A+B;
  if ((A<10e-10) and (X[i,j]<10e-10) and (X[i,j-1]>0)) then
    C:=A+B;
  if ((A<10e-10) and (X[i,j]>0) and (X[i,j-1]<10e-10)) then
    C:=A+B;
  if ((B<10e-10) and (X[i,j-1]<10e-10) and (X[i,j-2]>0)) then
    C:=A+B;
  if ((B<10e-10) and (X[i,j-1]>0) and (X[i,j-2]<10e-10)) then
    C:=A+B;
  if ((A<10e-10) and (Y[i,j]<10e-10) and (Y[i,j-1]>0)) then
    C:=2*Y[i,j-1]+B;
  if ((A<10e-10) and (Y[i,j]>0) and (Y[i,j-1]<10e-10)) then
    C:=2*Y[i,j]+B;
  if ((B<10e-10) and (Y[i,j-1]<10e-10) and (Y[i,j-2]>0)) then
    C:=A+2*Y[i,j-2];
  if ((B<10e-10) and (Y[i,j-1]>0) and (Y[i,j-2]<10e-10)) then
    C:=A+2*Y[i,j-1];
  dVx1dY:=(3*Vx[i,j,k,2]-4*Vx[i,j-1,k,2]+Vx[i,j-2,k,2])/C;
  dVy1dY:=(3*Vy[i,j,k,2]-4*Vy[i,j-1,k,2]+Vy[i,j-2,k,2])/C;
  dVz1dY:=(3*Vz[i,j,k,2]-4*Vz[i,j-1,k,2]+Vz[i,j-2,k,2])/C;
  A:=Abs(Abs(Y[i,j])-Abs(Y[i,j-1]));
  B:=Abs(Abs(Y[i,j-2])-Abs(Y[i,j-3]));
  C:=A*B;

```

```

if ((A<10e-10) and (X[i,j]<10e-10) and (X[i,j-1]>0)) then
  C:=B;
if ((A<10e-10) and (X[i,j]>0) and (X[i,j-1]<10e-10)) then
  C:=B;
if ((B<10e-10) and (X[i,j-2]<10e-10) and (X[i,j-3]>0)) then
  C:=A;
if ((B<10e-10) and (X[i,j-2]>0) and (X[i,j-3]<10e-10)) then
  C:=A;
if ((A<10e-10) and (Y[i,j]<10e-10) and (Y[i,j-1]>0)) then
  C:=2*Y[i,j-1]*B;
if ((A<10e-10) and (Y[i,j]>0) and (Y[i,j-1]<10e-10)) then
  C:=2*Y[i,j]*B;
if ((B<10e-10) and (Y[i,j-2]<10e-10) and (Y[i,j-3]>0)) then
  C:=A+2*Y[i,j-3];
if ((B<10e-10) and (Y[i,j-2]>0) and (Y[i,j-3]<10e-10)) then
  C:=A+2*Y[i,j-2];
d2VxdY2:=(2*Vx[i,j,k,2]-5*Vx[i,j-1,k,2]+4*Vx[i,j-2,k,2]-Vx[i,j-3,k,2])/C;
d2Vydy2:=(2*Vy[i,j,k,2]-5*Vy[i,j-1,k,2]+4*Vy[i,j-2,k,2]-Vy[i,j-3,k,2])/C;
d2VzdY2:=(2*Vz[i,j,k,2]-5*Vz[i,j-1,k,2]+4*Vz[i,j-2,k,2]-Vz[i,j-3,k,2])/C
end;
if ((i>=1) and (i<=N-1) and (j<=NumberOfCirclePoints[i-1])) then
begin
  A:=Abs(Abs(X[i+1,j])-Abs(X[i,j]));
  B:=Abs(Abs(X[i,j])-Abs(X[i-1,j]));
  C:=A+B;
  if ((A<10e-10) and (Y[i+1,j]<10e-10) and (Y[i,j]>0)) then
    C:=A+B;
  if ((A<10e-10) and (Y[i+1,j]>0) and (Y[i,j]<10e-10)) then
    C:=A+B;
  if ((B<10e-10) and (Y[i,j]<10e-10) and (Y[i-1,j]>0)) then
    C:=A+B;
  if ((B<10e-10) and (Y[i,j]>0) and (Y[i-1,j]<10e-10)) then
    C:=A+B;
  if ((A<10e-10) and (Y[i+1,j]<10e-10) and (Y[i,j]<10e-10)) then
    C:=10e20;
  if ((B<10e-10) and (Y[i,j]<10e-10) and (Y[i-1,j]<10e-10)) then
    C:=10e20;
  if ((A<10e-10) and (X[i+1,j]<10e-10) and (X[i,j]>0)) then
    C:=2*X[i,j]+B;
  if ((A<10e-10) and (X[i+1,j]>0) and (X[i,j]<10e-10)) then
    C:=2*X[i+1,j]+B;
  if ((B<10e-10) and (X[i,j]<10e-10) and (X[i-1,j]>0)) then
    C:=A+2*X[i-1,j];
  if ((B<10e-10) and (X[i,j]>0) and (X[i-1,j-2]<10e-10)) then
    C:=A+2*X[i,j];
  if ((A<10e-10) and (X[i+1,j]<10e-10) and (X[i,j]<10e-10)) then
    C:=10e20;
  if ((B<10e-10) and (X[i,j]<10e-10) and (X[i-1,j]<10e-10)) then
    C:=10e20;
  dVxdX:=(Vx[i+1,j,k,2]-Vx[i-1,j,k,2])/C;
  dVy1dX:=(Vy[i+1,j,k,2]-Vy[i-1,j,k,2])/C;
  dVz1dX:=(Vz[i+1,j,k,2]-Vz[i-1,j,k,2])/C
end;
if ((i>=1) and (i<=N-2) and (j>NumberOfCirclePoints[i-1])) then
begin
  A:=Abs(Abs(X[i+1,j])-Abs(X[i,j]));
  B:=Abs(Abs(X[i+2,j])-Abs(X[i+1,j]));
  C:=A*B;
  if ((A<10e-10) and (Y[i+1,j]<10e-10) and (Y[i,j]>0)) then
    C:=B;
  if ((A<10e-10) and (Y[i+1,j]>0) and (Y[i,j]<10e-10)) then

```

```

    C:=B;
    if ((B<10e-10) and (Y[i+2,j]<10e-10) and (Y[i+1,j]>0)) then
        C:=A;
    if ((B<10e-10) and (Y[i+2,j]>0) and (Y[i+1,j]<10e-10)) then
        C:=A;
    if ((A<10e-10) and (Y[i+1,j]<10e-10) and (Y[i,j]<10e-10)) then
        C:=10e20;
    if ((B<10e-10) and (Y[i+2,j]<10e-10) and (Y[i+1,j]<10e-10)) then
        C:=10e20;
    if ((A<10e-10) and (X[i+1,j]<10e-10) and (X[i,j]>0)) then
        C:=2*X[i,j]*B;
    if ((A<10e-10) and (X[i+1,j]>0) and (X[i,j]<10e-10)) then
        C:=2*X[i+1,j]*B;
    if ((B<10e-10) and (X[i+2,j]<10e-10) and (X[i+1,j]>0)) then
        C:=A+2*X[i+1,j];
    if ((B<10e-10) and (X[i+2,j]>0) and (X[i+1,j]<10e-10)) then
        C:=A+2*X[i+2,j];
    if ((A<10e-10) and (X[i+1,j]<10e-10) and (X[i,j]<10e-10)) then
        C:=10e20;
    if ((B<10e-10) and (X[i+2,j]<10e-10) and (X[i+1,j]<10e-10)) then
        C:=10e20;
    dVx1dX:=(-3*Vx[i,j,k,2]+4*Vx[i+1,j,k,2]-Vx[i+2,j,k,2])/C;
    dVy1dX:=(-3*Vy[i,j,k,2]+4*Vy[i+1,j,k,2]-Vy[i+2,j,k,2])/C;
    dVz1dX:=(-3*Vz[i,j,k,2]+4*Vz[i+1,j,k,2]-Vz[i+2,j,k,2])/C
end;
if ((i>=N-2) and (j<=NumberOfCirclePoints[i-2])) then
begin
    A:=Abs(Abs(X[i,j])-Abs(X[i-1,j]));
    B:=Abs(Abs(X[i-1,j])-Abs(X[i-2,j]));
    C:=A+B;
    if ((A<10e-10) and (Y[i,j]<10e-10) and (Y[i-1,j]>0)) then
        C:=A+B;
    if ((A<10e-10) and (Y[i,j]>0) and (Y[i-1,j]<10e-10)) then
        C:=A+B;
    if ((B<10e-10) and (Y[i-1,j]<10e-10) and (Y[i-2,j]>0)) then
        C:=A+B;
    if ((B<10e-10) and (Y[i-1,j]>0) and (Y[i-2,j]<10e-10)) then
        C:=A+B;
    if ((A<10e-10) and (Y[i,j]<10e-10) and (Y[i-1,j]<10e-10)) then
        C:=10e20;
    if ((B<10e-10) and (Y[i-1,j]<10e-10) and (Y[i-2,j]<10e-10)) then
        C:=10e20;
    if ((A<10e-10) and (X[i,j]<10e-10) and (X[i-1,j]>0)) then
        C:=2*X[i-1,j]+B;
    if ((A<10e-10) and (X[i,j]>0) and (X[i-1,j]<10e-10)) then
        C:=2*X[i,j]+B;
    if ((B<10e-10) and (X[i-1,j]<10e-10) and (X[i-2,j]>0)) then
        C:=A+2*X[i-2,j];
    if ((B<10e-10) and (X[i-1,j]>0) and (X[i-1,j]<10e-10)) then
        C:=A+2*X[i-1,j];
    if ((A<10e-10) and (X[i,j]<10e-10) and (X[i-1,j]<10e-10)) then
        C:=10e20;
    if ((B<10e-10) and (X[i-1,j]<10e-10) and (X[i-2,j]<10e-10)) then
        C:=10e20;
    dVx1dX:=(3*Vx[i,j,k,2]-4*Vx[i-1,j,k,2]+Vx[i-2,j,k,2])/C;
    dVy1dX:=(3*Vy[i,j,k,2]-4*Vy[i-1,j,k,2]+Vy[i-2,j,k,2])/C;
    dVz1dX:=(3*Vz[i,j,k,2]-4*Vz[i-1,j,k,2]+Vz[i-2,j,k,2])/C
end;
if ((i>N-2) and (j>NumberOfCirclePoints[i-2])) then
begin
    C:=2*Abs(Abs(X[i,j])-Abs(X[i-1,j]));

```

```

dVx1dX:=(Vx[i,j,k,2]+Vx[i+1,j,k,2]-Vx[i-1,j,k,2]-Vx[i-1,j-1,k,2])/C;
dVy1dX:=(Vy[i,j,k,2]+Vy[i+1,j,k,2]-Vy[i-1,j,k,2]-Vy[i-1,j-1,k,2])/C;
dVz1dX:=(Vz[i,j,k,2]+Vz[i+1,j,k,2]-Vz[i-1,j,k,2]-Vz[i-1,j-1,k,2])/C
end;
if ((i>=1) and (i<=N-1) and (j<=NumberOfCirclePoints[i-1])) then
begin
  A:=Abs(Abs(X[i+1,j])-Abs(X[i,j]));
  B:=Abs(Abs(X[i,j])-Abs(X[i-1,j]));
  C:=A*B;
  if ((A<10e-10) and (Y[i+1,j]<10e-10) and (Y[i,j]>0)) then
    C:=B;
  if ((A<10e-10) and (Y[i+1,j]>0) and (Y[i,j]<10e-10)) then
    C:=B;
  if ((B<10e-10) and (Y[i,j]<10e-10) and (Y[i-1,j]>0)) then
    C:=A;
  if ((B<10e-10) and (Y[i,j]>0) and (Y[i-1,j]<10e-10)) then
    C:=A;
  if ((A<10e-10) and (Y[i+1,j]<10e-10) and (Y[i,j]<10e-10)) then
    C:=10e20;
  if ((B<10e-10) and (Y[i,j]<10e-10) and (Y[i-1,j]<10e-10)) then
    C:=10e20;
  if ((A<10e-10) and (X[i+1,j]<10e-10) and (X[i,j]>0)) then
    C:=2*X[i,j]*B;
  if ((A<10e-10) and (X[i+1,j]>0) and (X[i,j]<10e-10)) then
    C:=2*X[i+1,j]*B;
  if ((B<10e-10) and (X[i,j]<10e-10) and (X[i-1,j]>0)) then
    C:=A+2*X[i-1,j];
  if ((B<10e-10) and (X[i,j]>0) and (X[i-1,j]<10e-10)) then
    C:=A+2*X[i,j];
  if ((A<10e-10) and (Y[i+1,j]<10e-10) and (Y[i,j]<10e-10)) then
    C:=10e20;
  if ((B<10e-10) and (Y[i,j]<10e-10) and (Y[i-1,j]<10e-10)) then
    C:=10e20;
  d2VxdX2:=(Vx[i+1,j,k,2]-2*Vx[i,j,k,2]+Vx[i-1,j,k,2])/C;
  d2VydX2:=(Vy[i+1,j,k,2]-2*Vy[i,j,k,2]+Vy[i-1,j,k,2])/C;
  d2VzdX2:=(Vz[i+1,j,k,2]-2*Vz[i,j,k,2]+Vz[i-1,j,k,2])/C
end;
if ((i>=1) and (i<=N-3) and (j>NumberOfCirclePoints[i-1])) then
begin
  A:=Abs(Abs(X[i+3,j])-Abs(X[i+2,j]));
  B:=Abs(Abs(X[i+1,j])-Abs(X[i,j]));
  C:=A*B;
  if ((A<10e-10) and (Y[i+3,j]<10e-10) and (Y[i+2,j]>0)) then
    C:=B;
  if ((A<10e-10) and (Y[i+3,j]>0) and (Y[i+2,j]<10e-10)) then
    C:=B;
  if ((B<10e-10) and (Y[i+1,j]<10e-10) and (Y[i,j]>0)) then
    C:=A;
  if ((B<10e-10) and (Y[i+1,j]>0) and (Y[i,j]<10e-10)) then
    C:=A;
  if ((A<10e-10) and (Y[i+3,j]<10e-10) and (Y[i+2,j]<10e-10)) then
    C:=10e20;
  if ((B<10e-10) and (Y[i+1,j]<10e-10) and (Y[i,j]<10e-10)) then
    C:=10e20;
  if ((A<10e-10) and (X[i+3,j]<10e-10) and (X[i+2,j]>0)) then
    C:=2*X[i+2,j]*B;
  if ((A<10e-10) and (X[i+3,j]>0) and (X[i+2,j]<10e-10)) then
    C:=2*X[i+3,j]*B;
  if ((B<10e-10) and (X[i+1,j]<10e-10) and (X[i,j]>0)) then
    C:=A+2*X[i,j];
  if ((B<10e-10) and (X[i+1,j]>0) and (X[i,j]<10e-10)) then

```

```

C:=A+2*X[i+1,j];
if ((A<10e-10) and (Y[i+3,j]<10e-10) and (Y[i+2,j]<10e-10)) then
  C:=10e20;
if ((B<10e-10) and (Y[i+1,j]<10e-10) and (Y[i,j]<10e-10)) then
  C:=10e20;
d2VxdX2:=(-Vx[i+3,j,k,2]+4*Vx[i+2,j,k,2]-5*Vx[i+1,j,k,2]+2*Vx[i,j,k,2])/C;
d2VydX2:=(-Vy[i+3,j,k,2]+4*Vy[i+2,j,k,2]-5*Vy[i+1,j,k,2]+2*Vy[i,j,k,2])/C;
d2VzdX2:=(-Vz[i+3,j,k,2]+4*Vz[i+2,j,k,2]-5*Vz[i+1,j,k,2]+2*Vz[i,j,k,2])/C
end;
if (i=N)then
begin
  dVx1dX:=0.0;          dVy1dX:=0.0;          dVz1dX:=0.0;
  d2VxdX2:=0.0;          d2VydX2:=0.0;          d2VzdX2:=0.0;
  dVx1dY:=0.0;          dVy1dY:=0.0;          dVz1dY:=0.0;
  d2VxdY2:=0.0;          d2VydY2:=0.0;          d2VzdY2:=0.0;
  dVx1dZ:=0.0;          dVy1dZ:=0.0;          dVz1dZ:=0.0;
  d2VxdZ2:=0.0;          d2VydZ2:=0.0;          d2VzdZ2:=0.0
end;
A:=Sqrt(Sqr(X[i,j])+Sqr(Y[i,j]));
if ((A<=Dbody)and(k>=StartZofBody)and(k<=FinalZofBody))then
begin
  dVx1dX:=0.0;          dVy1dX:=0.0;          dVz1dX:=0.0;
  d2VxdX2:=0.0;          d2VydX2:=0.0;          d2VzdX2:=0.0;
  dVx1dY:=0.0;          dVy1dY:=0.0;          dVz1dY:=0.0;
  d2VxdY2:=0.0;          d2VydY2:=0.0;          d2VzdY2:=0.0;
  dVx1dZ:=0.0;          dVy1dZ:=0.0;          dVz1dZ:=0.0;
  d2VxdZ2:=0.0;          d2VydZ2:=0.0;          d2VzdZ2:=0.0
end;
dP:=dVy1dY*dVz1dZ-dVy1dZ*dVz1dY+dVz1dZ*dVx1dX-dVz1dX*dVx1dZ;
P[i,j,k,2]:=P[i,j,k,1]+dP;
  dVzVxdZ:=((3*Vz[i,j,k,2]-Vz[i,j,k,1])/2)*dVx1dZ;
Vx[i,j,k,3]:=(4*Vx[i,j,k,2]-Vx[i,j,k,1])/3-2*dT*(dVzVxdZ+d2VxdZ2*Viscosity);
  dVzVydZ:=((3*Vz[i,j,k,2]-Vz[i,j,k,1])/2)*dVy1dZ;
Vy[i,j,k,3]:=(4*Vy[i,j,k,2]-Vy[i,j,k,1])/3-2*dT*(dVzVydZ+d2VydZ2*Viscosity);
  dVzVzdZ:=((3*Vz[i,j,k,2]-Vz[i,j,k,1])/2)*dVz1dZ;
Vz[i,j,k,3]:=(4*Vz[i,j,k,2]-Vz[i,j,k,1])/3-2*dT*(dVzVzdZ-
dP+d2VzdZ2*Viscosity);
  P[i,j,k,1]:=P[i,j,k,2];
  Vx[i,j,k,1]:=Vx[i,j,k,2];
  Vy[i,j,k,1]:=Vy[i,j,k,2];
  Vz[i,j,k,1]:=Vz[i,j,k,2];
  Vx[i,j,k,2]:=Vx[i,j,k,3];
  Vy[i,j,k,2]:=Vy[i,j,k,3];
  Vz[i,j,k,2]:=Vz[i,j,k,3];

// 1 система уравнений - движение по координате X
if k=0 then
begin
  dVx1dZ:=(-3*Vx[i,j,k,2]+4*Vx[i,j,k+1,2]-Vx[i,j,k+2,2])/((Z[k+2]-
Z[k+1])+(Z[k+1]-Z[k]));
  dVy1dZ:=(-3*Vy[i,j,k,2]+4*Vy[i,j,k+1,2]-Vy[i,j,k+2,2])/((Z[k+2]-
Z[k+1])+(Z[k+1]-Z[k]));
  dVz1dZ:=(-3*Vz[i,j,k,2]+4*Vz[i,j,k+1,2]-Vz[i,j,k+2,2])/((Z[k+2]-
Z[k+1])+(Z[k+1]-Z[k]));
  d2VxdZ2:=(-Vx[i,j,k+3,2]+4*Vx[i,j,k+2,2]-
5*Vx[i,j,k+1,2]+2*Vx[i,j,k,2])/((Z[k+3]-Z[k+2])*(Z[k+1]-Z[k]));
  d2VydZ2:=(-Vy[i,j,k+3,2]+4*Vy[i,j,k+2,2]-
5*Vy[i,j,k+1,2]+2*Vy[i,j,k,2])/((Z[k+3]-Z[k+2])*(Z[k+1]-Z[k]));
  d2VzdZ2:=(-Vz[i,j,k+3,2]+4*Vz[i,j,k+2,2]-
5*Vz[i,j,k+1,2]+2*Vz[i,j,k,2])/((Z[k+3]-Z[k+2])*(Z[k+1]-Z[k]));
end;

```

```

if ((k>=1) and (k<=Zc-1)) then
  begin
    dVx1dZ:=(Vx[i,j,k+1,2]-Vx[i,j,k-1,2])/((Z[k+1]-Z[k])+(Z[k]-Z[k-1]));
    dVy1dZ:=(Vy[i,j,k+1,2]-Vy[i,j,k-1,2])/((Z[k+1]-Z[k])+(Z[k]-Z[k-1]));
    dVz1dZ:=(Vz[i,j,k+1,2]-Vz[i,j,k-1,2])/((Z[k+1]-Z[k])+(Z[k]-Z[k-1]));
    d2VxdZ2:=(Vx[i,j,k+1,2]-2*Vx[i,j,k,2]+Vx[i,j,k-1,2])/((Z[k+1]-Z[k])*(Z[k]-Z[k-1]));
    d2VydZ2:=(Vy[i,j,k+1,2]-2*Vy[i,j,k,2]+Vy[i,j,k-1,2])/((Z[k+1]-Z[k])*(Z[k]-Z[k-1]));
    d2VzdZ2:=(Vz[i,j,k+1,2]-2*Vz[i,j,k,2]+Vz[i,j,k-1,2])/((Z[k+1]-Z[k])*(Z[k]-Z[k-1]));
  end;
if k=Zc then
  begin
    dVx1dZ:=(3*Vx[i,j,k,2]-4*Vx[i,j,k-1,2]+Vx[i,j,k-2,2])/((Z[k]-Z[k-1])+(Z[k-1]-Z[k-2]));
    dVy1dZ:=(3*Vy[i,j,k,2]-4*Vy[i,j,k-1,2]+Vy[i,j,k-2,2])/((Z[k]-Z[k-1])+(Z[k-1]-Z[k-2]));
    dVz1dZ:=(3*Vz[i,j,k,2]-4*Vz[i,j,k-1,2]+Vz[i,j,k-2,2])/((Z[k]-Z[k-1])+(Z[k-1]-Z[k-2]));
    d2VxdZ2:=(2*Vx[i,j,k,2]-5*Vx[i,j,k-1,2]+4*Vx[i,j,k-2,2]-Vx[i,j,k-3,2])/((Z[k]-Z[k-1])*(Z[k-2]-Z[k-3]));
    d2VydZ2:=(2*Vy[i,j,k,2]-5*Vy[i,j,k-1,2]+4*Vy[i,j,k-2,2]-Vy[i,j,k-3,2])/((Z[k]-Z[k-1])*(Z[k-2]-Z[k-3]));
    d2VzdZ2:=(2*Vz[i,j,k,2]-5*Vz[i,j,k-1,2]+4*Vz[i,j,k-2,2]-Vz[i,j,k-3,2])/((Z[k]-Z[k-1])*(Z[k-2]-Z[k-3]));
  end;
if ((i<=N-1) and (j=0) and (i<>0)) then
  begin
    A:=Abs(Abs(Y[i,j+1])-Abs(Y[i,j]));
    B:=Abs(Abs(Y[i,j+2])-Abs(Y[i,j+1]));
    C:=A+B;
    if ((A<10e-10) and (X[i,j+1]<10e-10) and (X[i,j]>0)) then
      C:=A+B;
    if ((A<10e-10) and (X[i,j+1]>0) and (X[i,j]<10e-10)) then
      C:=A+B;
    if ((B<10e-10) and (X[i,j+2]<10e-10) and (X[i,j+1]>0)) then
      C:=A+B;
    if ((B<10e-10) and (X[i,j+2]>0) and (X[i,j+1]<10e-10)) then
      C:=A+B;
    if ((A<10e-10) and (Y[i,j+1]<10e-10) and (Y[i,j]>0)) then
      C:=2*Y[i,j]+B;
    if ((A<10e-10) and (Y[i,j+1]>0) and (Y[i,j]<10e-10)) then
      C:=2*Y[i,j+1]+B;
    if ((B<10e-10) and (Y[i,j+2]<10e-10) and (Y[i,j+1]>0)) then
      C:=A+2*Y[i,j+1];
    if ((B<10e-10) and (Y[i,j+2]>0) and (Y[i,j+1]<10e-10)) then
      C:=A+2*Y[i,j+2];
    dVx1dY:=(-3*Vx[i,j,k,2]+4*Vx[i,j+1,k,2]-Vx[i,j+2,k,2])/C;
    dVy1dY:=(-3*Vy[i,j,k,2]+4*Vy[i,j+1,k,2]-Vy[i,j+2,k,2])/C;
    dVz1dY:=(-3*Vz[i,j,k,2]+4*Vz[i,j+1,k,2]-Vz[i,j+2,k,2])/C;
    A:=Abs(Abs(Y[i,j+3])-Abs(Y[i,j+2]));
    B:=Abs(Abs(Y[i,j+1])-Abs(Y[i,j]));
    C:=A*B;
    if ((A<10e-10) and (X[i,j+3]<10e-10) and (X[i,j+2]>0)) then
      C:=B;
    if ((A<10e-10) and (X[i,j+3]>0) and (X[i,j+2]<10e-10)) then
      C:=B;
    if ((B<10e-10) and (X[i,j+1]<10e-10) and (X[i,j]>0)) then
      C:=A;
    if ((B<10e-10) and (X[i,j+1]>0) and (X[i,j]<10e-10)) then

```

```

C:=A;
if ((A<10e-10) and (Y[i,j+3]<10e-10) and (Y[i,j+2]>0)) then
  C:=2*Y[i,j+2]*B;
if ((A<10e-10) and (Y[i,j+3]>0) and (Y[i,j+2]<10e-10)) then
  C:=2*Y[i,j+3]*B;
if ((B<10e-10) and (Y[i,j+1]<10e-10) and (Y[i,j]>0)) then
  C:=A+2*Y[i,j];
if ((B<10e-10) and (Y[i,j+1]>0) and (Y[i,j]<10e-10)) then
  C:=A+2*Y[i,j+1];

d2VxdY2:=(-Vx[i,j+3,k,2]+4*Vx[i,j+2,k,2]-5*Vx[i,j+1,k,2])+2*Vx[i,j,k,2]/C;
d2VydY2:=(-Vy[i,j+3,k,2]+4*Vy[i,j+2,k,2]-5*Vy[i,j+1,k,2])+2*Vy[i,j,k,2]/C;
d2VzdY2:=(-Vz[i,j+3,k,2]+4*Vz[i,j+2,k,2]-5*Vz[i,j+1,k,2])+2*Vz[i,j,k,2]/C
end;
if ((i<=N-1) and (j>=1) and (j<=NumberOfCirclePoints[i]-1) and (i<>0)) then
begin
  A:=Abs(Abs(Y[i,j+1])-Abs(Y[i,j]));
  B:=Abs(Abs(Y[i,j])-Abs(Y[i,j-1]));
  C:=A+B;
  if ((A<10e-10) and (X[i,j+1]<10e-10) and (X[i,j]>0)) then
    C:=A+B;
  if ((A<10e-10) and (X[i,j+1]>0) and (X[i,j]<10e-10)) then
    C:=A+B;
  if ((B<10e-10) and (X[i,j]<10e-10) and (X[i,j-1]>0)) then
    C:=A+B;
  if ((B<10e-10) and (X[i,j]>0) and (X[i,j-1]<10e-10)) then
    C:=A+B;
  if ((A<10e-10) and (Y[i,j+1]<10e-10) and (Y[i,j]>0)) then
    C:=2*Y[i,j]+B;
  if ((A<10e-10) and (Y[i,j+1]>0) and (Y[i,j]<10e-10)) then
    C:=2*Y[i,j+1]+B;
  if ((B<10e-10) and (Y[i,j]<10e-10) and (Y[i,j-1]>0)) then
    C:=A+2*Y[i,j-1];
  if ((B<10e-10) and (Y[i,j]>0) and (Y[i,j-1]<0)) then
    C:=A+2*Y[i,j];
  dVx1dY:=(Vx[i,j+1,k,2]-Vx[i,j-1,k,2])/C;
  dVy1dY:=(Vy[i,j+1,k,2]-Vy[i,j-1,k,2])/C;
  dVz1dY:=(Vz[i,j+1,k,2]-Vz[i,j-1,k,2])/C;
  A:=Abs(Abs(Y[i,j+1])-Abs(Y[i,j]));
  B:=Abs(Abs(Y[i,j])-Abs(Y[i,j-1]));
  C:=A*B;
  if ((A<10e-10) and (X[i,j+1]<10e-10) and (X[i,j]>0)) then
    C:=B;
  if ((A<10e-10) and (X[i,j+1]>0) and (X[i,j]<10e-10)) then
    C:=B;
  if ((B<10e-10) and (X[i,j]<10e-10) and (X[i,j-1]>0)) then
    C:=A;
  if ((B<10e-10) and (X[i,j]>0) and (X[i,j-1]<10e-10)) then
    C:=A;
  if ((A<10e-10) and (Y[i,j+1]<10e-10) and (Y[i,j]>0)) then
    C:=2*Y[i,j]*B;
  if ((A<10e-10) and (Y[i,j+1]>0) and (Y[i,j]<10e-10)) then
    C:=2*Y[i,j+1]*B;
  if ((B<10e-10) and (Y[i,j]<10e-10) and (Y[i,j-1]>0)) then
    C:=A+2*Y[i,j-1];
  if ((B<10e-10) and (Y[i,j]>0) and (Y[i,j-1]<10e-10)) then
    C:=A+2*Y[i,j];
  d2VxdY2:=(Vx[i,j+1,k,2]-2*Vx[i,j,k,2]+Vx[i,j-1,k,2])/C;
  d2VydY2:=(Vy[i,j+1,k,2]-2*Vy[i,j,k,2]+Vy[i,j-1,k,2])/C;
  d2VzdY2:=(Vz[i,j+1,k,2]-2*Vz[i,j,k,2]+Vz[i,j-1,k,2])/C
end;

```

```

if ((i<=N) and (j=NumberOfCirclePoints[i]) and (i<>0)) then
begin
A:=Abs(Abs(Y[i,j])-Abs(Y[i,j-1]));
B:=Abs(Abs(Y[i,j-1])-Abs(Y[i,j-2]));
C:=A+B;
if ((A<10e-10) and (X[i,j]<10e-10) and (X[i,j-1]>0)) then
C:=A+B;
if ((A<10e-10) and (X[i,j]>0) and (X[i,j-1]<10e-10)) then
C:=A+B;
if ((B<10e-10) and (X[i,j-1]<10e-10) and (X[i,j-2]>0)) then
C:=A+B;
if ((B<10e-10) and (X[i,j-1]>0) and (X[i,j-2]<10e-10)) then
C:=A+B;
if ((A<10e-10) and (Y[i,j]<10e-10) and (Y[i,j-1]>0)) then
C:=2*Y[i,j-1]+B;
if ((A<10e-10) and (Y[i,j]>0) and (Y[i,j-1]<10e-10)) then
C:=2*Y[i,j]+B;
if ((B<10e-10) and (Y[i,j-1]<10e-10) and (Y[i,j-2]>0)) then
C:=A+2*Y[i,j-2];
if ((B<10e-10) and (Y[i,j-1]>0) and (Y[i,j-2]<10e-10)) then
C:=A+2*Y[i,j-1];
dVx1dY:=(3*Vx[i,j,k,2]-4*Vx[i,j-1,k,2]+Vx[i,j-2,k,2])/C;
dVy1dY:=(3*Vy[i,j,k,2]-4*Vy[i,j-1,k,2]+Vy[i,j-2,k,2])/C;
dVz1dY:=(3*Vz[i,j,k,2]-4*Vz[i,j-1,k,2]+Vz[i,j-2,k,2])/C;
A:=Abs(Abs(Y[i,j])-Abs(Y[i,j-1]));
B:=Abs(Abs(Y[i,j-2])-Abs(Y[i,j-3]));
C:=A*B;
if ((A<10e-10) and (X[i,j]<10e-10) and (X[i,j-1]>0)) then
C:=B;
if ((A<10e-10) and (X[i,j]>0) and (X[i,j-1]<10e-10)) then
C:=B;
if ((B<10e-10) and (X[i,j-2]<10e-10) and (X[i,j-3]>0)) then
C:=A;
if ((B<10e-10) and (X[i,j-2]>0) and (X[i,j-3]<10e-10)) then
C:=A;
if ((A<10e-10) and (Y[i,j]<10e-10) and (Y[i,j-1]>0)) then
C:=2*Y[i,j-1]*B;
if ((A<10e-10) and (Y[i,j]>0) and (Y[i,j-1]<10e-10)) then
C:=2*Y[i,j]*B;
if ((B<10e-10) and (Y[i,j-2]<10e-10) and (Y[i,j-3]>0)) then
C:=A+2*Y[i,j-3];
if ((B<10e-10) and (Y[i,j-2]>0) and (Y[i,j-3]<10e-10)) then
C:=A+2*Y[i,j-2];
d2VxdY2:=(2*Vx[i,j,k,2]-5*Vx[i,j-1,k,2]+4*Vx[i,j-2,k,2]-Vx[i,j-3,k,2])/C;
d2VydY2:=(2*Vy[i,j,k,2]-5*Vy[i,j-1,k,2]+4*Vy[i,j-2,k,2]-Vy[i,j-3,k,2])/C;
d2VzdY2:=(2*Vz[i,j,k,2]-5*Vz[i,j-1,k,2]+4*Vz[i,j-2,k,2]-Vz[i,j-3,k,2])/C;
end;
if ((i>=1) and (i<=N-1) and (j<=NumberOfCirclePoints[i-1])) then
begin
A:=Abs(Abs(X[i+1,j])-Abs(X[i,j]));
B:=Abs(Abs(X[i,j])-Abs(X[i-1,j]));
C:=A+B;
if ((A<10e-10) and (Y[i+1,j]<10e-10) and (Y[i,j]>0)) then
C:=A+B;
if ((A<10e-10) and (Y[i+1,j]>0) and (Y[i,j]<10e-10)) then
C:=A+B;
if ((B<10e-10) and (Y[i,j]<10e-10) and (Y[i-1,j]>0)) then
C:=A+B;
if ((B<10e-10) and (Y[i,j]>0) and (Y[i-1,j]<10e-10)) then
C:=A+B;
if ((A<10e-10) and (Y[i+1,j]<10e-10) and (Y[i,j]<10e-10)) then

```

```

    C:=10e20;
    if ((B<10e-10) and (Y[i,j]<10e-10) and (Y[i-1,j]<10e-10)) then
        C:=10e20;
    if ((A<10e-10) and (X[i+1,j]<10e-10) and (X[i,j]>0)) then
        C:=2*X[i,j]+B;
    if ((A<10e-10) and (X[i+1,j]>0) and (X[i,j]<10e-10)) then
        C:=2*X[i+1,j]+B;
    if ((B<10e-10) and (X[i,j]<10e-10) and (X[i-1,j]>0)) then
        C:=A+2*X[i-1,j];
    if ((B<10e-10) and (X[i,j]>0) and (X[i-1,j-2]<10e-10)) then
        C:=A+2*X[i,j];
    if ((A<10e-10) and (X[i+1,j]<10e-10) and (X[i,j]<10e-10)) then
        C:=10e20;
    if ((B<10e-10) and (X[i,j]<10e-10) and (X[i-1,j]<10e-10)) then
        C:=10e20;
    dVx1dX:=(Vx[i+1,j,k,2]-Vx[i-1,j,k,2])/C;
    dVy1dX:=(Vy[i+1,j,k,2]-Vy[i-1,j,k,2])/C;
    dVz1dX:=(Vz[i+1,j,k,2]-Vz[i-1,j,k,2])/C;
end;
if ((i>=1) and (i<=N-2) and (j>NumberOfCirclePoints[i-1])) then
begin
    A:=Abs(Abs(X[i+1,j])-Abs(X[i,j]));
    B:=Abs(Abs(X[i+2,j])-Abs(X[i+1,j]));
    C:=A*B;
    if ((A<10e-10) and (Y[i+1,j]<10e-10) and (Y[i,j]>0)) then
        C:=B;
    if ((A<10e-10) and (Y[i+1,j]>0) and (Y[i,j]<10e-10)) then
        C:=B;
    if ((B<10e-10) and (Y[i+2,j]<10e-10) and (Y[i+1,j]>0)) then
        C:=A;
    if ((B<10e-10) and (Y[i+2,j]>0) and (Y[i+1,j]<10e-10)) then
        C:=A;
    if ((A<10e-10) and (Y[i+1,j]<10e-10) and (Y[i,j]<10e-10)) then
        C:=10e20;
    if ((B<10e-10) and (Y[i+2,j]<10e-10) and (Y[i+1,j]<10e-10)) then
        C:=10e20;
    if ((A<10e-10) and (X[i+1,j]<10e-10) and (X[i,j]>0)) then
        C:=2*X[i,j]*B;
    if ((A<10e-10) and (X[i+1,j]>0) and (X[i,j]<10e-10)) then
        C:=2*X[i+1,j]*B;
    if ((B<10e-10) and (X[i+2,j]<10e-10) and (X[i+1,j]>0)) then
        C:=A+2*X[i+1,j];
    if ((B<10e-10) and (X[i+2,j]>0) and (X[i+1,j]<10e-10)) then
        C:=A+2*X[i+2,j];
    if ((A<10e-10) and (X[i+1,j]<10e-10) and (X[i,j]<10e-10)) then
        C:=10e20;
    if ((B<10e-10) and (X[i+2,j]<10e-10) and (X[i+1,j]<10e-10)) then
        C:=10e20;
    dVx1dX:=(-3*Vx[i,j,k,2]+4*Vx[i+1,j,k,2]-Vx[i+2,j,k,2])/C;
    dVy1dX:=(-3*Vy[i,j,k,2]+4*Vy[i+1,j,k,2]-Vy[i+2,j,k,2])/C;
    dVz1dX:=(-3*Vz[i,j,k,2]+4*Vz[i+1,j,k,2]-Vz[i+2,j,k,2])/C;
end;
if ((i>=N-2) and (j<=NumberOfCirclePoints[i-2])) then
begin
    A:=Abs(Abs(X[i,j])-Abs(X[i-1,j]));
    B:=Abs(Abs(X[i-1,j])-Abs(X[i-2,j]));
    C:=A+B;
    if ((A<10e-10) and (Y[i,j]<10e-10) and (Y[i-1,j]>0)) then
        C:=A+B;
    if ((A<10e-10) and (Y[i,j]>0) and (Y[i-1,j]<10e-10)) then
        C:=A+B;

```

```

if ((B<10e-10) and (Y[i-1,j]<10e-10) and (Y[i-2,j]>0)) then
  C:=A+B;
if ((B<10e-10) and (Y[i-1,j]>0) and (Y[i-2,j]<10e-10)) then
  C:=A+B;
if ((A<10e-10) and (Y[i,j]<10e-10) and (Y[i-1,j]<10e-10)) then
  C:=10e20;
if ((B<10e-10) and (Y[i-1,j]<10e-10) and (Y[i-2,j]<10e-10)) then
  C:=10e20;
if ((A<10e-10) and (X[i,j]<10e-10) and (X[i-1,j]>0)) then
  C:=2*X[i-1,j]+B;
if ((A<10e-10) and (X[i,j]>0) and (X[i-1,j]<10e-10)) then
  C:=2*X[i,j]+B;
if ((B<10e-10) and (X[i-1,j]<10e-10) and (X[i-2,j]>0)) then
  C:=A+2*X[i-2,j];
if ((B<10e-10) and (X[i-1,j]>0) and (X[i-1,j]<10e-10)) then
  C:=A+2*X[i-1,j];
if ((A<10e-10) and (X[i,j]<10e-10) and (X[i-1,j]<10e-10)) then
  C:=10e20;
if ((B<10e-10) and (X[i-1,j]<10e-10) and (X[i-2,j]<10e-10)) then
  C:=10e20;
dVx1dX:=(3*Vx[i,j,k,2]-4*Vx[i-1,j,k,2]+Vx[i-2,j,k,2])/C;
dVy1dX:=(3*Vy[i,j,k,2]-4*Vy[i-1,j,k,2]+Vy[i-2,j,k,2])/C;
dVz1dX:=(3*Vz[i,j,k,2]-4*Vz[i-1,j,k,2]+Vz[i-2,j,k,2])/C
end;
if ((i>N-2) and (j>NumberOfCirclePoints[i-2])) then
begin
  C:=2*Abs(Abs(X[i,j])-Abs(X[i-1,j]));
  dVx1dX:=(Vx[i,j,k,2]+Vx[i+1,j,k,2]-Vx[i-1,j,k,2]-Vx[i-1,j-1,k,2])/C;
  dVy1dX:=(Vy[i,j,k,2]+Vy[i+1,j,k,2]-Vy[i-1,j,k,2]-Vy[i-1,j-1,k,2])/C;
  dVz1dX:=(Vz[i,j,k,2]+Vz[i+1,j,k,2]-Vz[i-1,j,k,2]-Vz[i-1,j-1,k,2])/C
end;
if ((i>=1) and (i<=N-1) and (j<=NumberOfCirclePoints[i-1])) then
begin
  A:=Abs(Abs(X[i+1,j])-Abs(X[i,j]));
  B:=Abs(Abs(X[i,j])-Abs(X[i-1,j]));
  C:=A*B;
  if ((A<10e-10) and (Y[i+1,j]<10e-10) and (Y[i,j]>0)) then
    C:=B;
  if ((A<10e-10) and (Y[i+1,j]>0) and (Y[i,j]<10e-10)) then
    C:=B;
  if ((B<10e-10) and (Y[i,j]<10e-10) and (Y[i-1,j]>0)) then
    C:=A;
  if ((B<10e-10) and (Y[i,j]>0) and (Y[i-1,j]<10e-10)) then
    C:=A;
  if ((A<10e-10) and (X[i+1,j]<10e-10) and (X[i,j]<10e-10)) then
    C:=10e20;
  if ((B<10e-10) and (X[i,j]<10e-10) and (X[i-1,j]<10e-10)) then
    C:=10e20;
  if ((A<10e-10) and (X[i+1,j]<10e-10) and (X[i,j]>0)) then
    C:=2*X[i,j]*B;
  if ((A<10e-10) and (X[i+1,j]>0) and (X[i,j]<10e-10)) then
    C:=2*X[i+1,j]*B;
  if ((B<10e-10) and (X[i,j]<10e-10) and (X[i-1,j]>0)) then
    C:=A+2*X[i-1,j];
  if ((B<10e-10) and (X[i,j]>0) and (X[i-1,j]<10e-10)) then
    C:=A+2*X[i,j];
  if ((A<10e-10) and (X[i+1,j]<10e-10) and (X[i,j]<10e-10)) then
    C:=10e20;
  if ((B<10e-10) and (X[i,j]<10e-10) and (X[i-1,j]<10e-10)) then
    C:=10e20;
  d2VxdX2:=(Vx[i+1,j,k,2]-2*Vx[i,j,k,2]+Vx[i-1,j,k,2])/C;

```

```

d2VydX2:=(Vy[i+1,j,k,2]-2*Vy[i,j,k,2]+Vy[i-1,j,k,2])/C;
d2VzdX2:=(Vz[i+1,j,k,2]-2*Vz[i,j,k,2]+Vz[i-1,j,k,2])/C
end;
if ((i>=1) and (i<=N-3) and (j>NumberOfCirclePoints[i-1])) then
begin
//"fjT≈K>≈ K"R≈¬K... - K S » -sK-Ku... hkh≈K""
A:=Abs(Abs(X[i+3,j])-Abs(X[i+2,j]));
B:=Abs(Abs(X[i+1,j])-Abs(X[i,j]));
C:=A*B;
if ((A<10e-10) and (Y[i+3,j]<10e-10) and (Y[i+2,j]>0)) then
C:=B;
if ((A<10e-10) and (Y[i+3,j]>0) and (Y[i+2,j]<10e-10)) then
C:=B;
if ((B<10e-10) and (Y[i+1,j]<10e-10) and (Y[i,j]>0)) then
C:=A;
if ((B<10e-10) and (Y[i+1,j]>0) and (Y[i,j]<10e-10)) then
C:=A;
if ((A<10e-10) and (Y[i+3,j]<10e-10) and (Y[i+2,j]<10e-10)) then
C:=10e20;
if ((B<10e-10) and (Y[i+1,j]<10e-10) and (Y[i,j]<10e-10)) then
C:=10e20;
if ((A<10e-10) and (X[i+3,j]<10e-10) and (X[i+2,j]>0)) then
C:=2*X[i+2,j]*B;
if ((A<10e-10) and (X[i+3,j]>0) and (X[i+2,j]<10e-10)) then
C:=2*X[i+3,j]*B;
if ((B<10e-10) and (X[i+1,j]<10e-10) and (X[i,j]>0)) then
C:=A+2*X[i,j];
if ((B<10e-10) and (X[i+1,j]>0) and (X[i,j]<10e-10)) then
C:=A+2*X[i+1,j];
if ((A<10e-10) and (X[i+3,j]<10e-10) and (X[i+2,j]<10e-10)) then
C:=10e20;
if ((B<10e-10) and (X[i+1,j]<10e-10) and (X[i,j]<10e-10)) then
C:=10e20;
d2VxdX2:=(-Vx[i+3,j,k,2]+4*Vx[i+2,j,k,2]-5*Vx[i+1,j,k,2]+2*Vx[i,j,k,2])/C;
d2VydX2:=(-Vy[i+3,j,k,2]+4*Vy[i+2,j,k,2]-5*Vy[i+1,j,k,2]+2*Vy[i,j,k,2])/C;
d2VzdX2:=(-Vz[i+3,j,k,2]+4*Vz[i+2,j,k,2]-5*Vz[i+1,j,k,2]+2*Vz[i,j,k,2])/C
end;
if (i=N)then
begin
dVx1dX:=0.0;          dVy1dX:=0.0;          dVz1dX:=0.0;
d2VxdX2:=0.0;          d2VydX2:=0.0;          d2VzdX2:=0.0;
dVx1dY:=0.0;          dVy1dY:=0.0;          dVz1dY:=0.0;
d2VxdY2:=0.0;          d2VydY2:=0.0;          d2VzdY2:=0.0;
dVx1dZ:=0.0;          dVy1dZ:=0.0;          dVz1dZ:=0.0;
d2VxdZ2:=0.0;          d2VydZ2:=0.0;          d2VzdZ2:=0.0
end;
A:=Sqrt(Sqr(X[i,j])+Sqr(Y[i,j]));
if ((A<=Dbody)and(k>=StartZofBody)and(k<=FinalZofBody))then
begin
dVx1dX:=0.0;          dVy1dX:=0.0;          dVz1dX:=0.0;
d2VxdX2:=0.0;          d2VydX2:=0.0;          d2VzdX2:=0.0;
dVx1dY:=0.0;          dVy1dY:=0.0;          dVz1dY:=0.0;
d2VxdY2:=0.0;          d2VydY2:=0.0;          d2VzdY2:=0.0;
dVx1dZ:=0.0;          dVy1dZ:=0.0;          dVz1dZ:=0.0;
d2VxdZ2:=0.0;          d2VydZ2:=0.0;          d2VzdZ2:=0.0
end;
dP:=dVx1dX*dVy1dY-dVy1dX*dVx1dY+dVz1dZ*dVx1dX-dVz1dX*dVx1dZ;
P[i,j,k,2]:=P[i,j,k,1]+dP;
dVxVxdX:=( (3*Vx[i,j,k,2]-Vx[i,j,k,1])/2)*dVx1dX;
Vx[i,j,k,3]:=(4*Vx[i,j,k,2]-Vx[i,j,k,1])/3-2*dT*(dVxVxdX-
dP+d2VxdX2*Viscosity);

```

```

        dVxVydX:=( (3*Vx[i,j,k,2]-Vx[i,j,k,1])/2)*dVy1dX;
Vy[i,j,k,3]:=(4*Vy[i,j,k,2]-Vy[i,j,k,1])/3-2*dT*(dVxVydX+d2VydX2*Viscosity);
        dVxVzdX:=( (3*Vx[i,j,k,2]-Vx[i,j,k,1])/2)*dVz1dX;
Vz[i,j,k,3]:=(4*Vz[i,j,k,2]-Vz[i,j,k,1])/3-2*dT*(dVxVzdX+d2VzdX2*Viscosity);
        P[i,j,k,1]:=P[i,j,k,2];
        Vx[i,j,k,1]:=Vx[i,j,k,2];
        Vy[i,j,k,1]:=Vy[i,j,k,2];
        Vz[i,j,k,1]:=Vz[i,j,k,2];
        Vx[i,j,k,2]:=Vx[i,j,k,3];
        Vy[i,j,k,2]:=Vy[i,j,k,3];
        Vz[i,j,k,2]:=Vz[i,j,k,3];

// 2 система уравнений - движение по координате Y
if k=0 then
begin
    dVx1dZ:=(-3*Vx[i,j,k,2]+4*Vx[i,j,k+1,2]-Vx[i,j,k+2,2])/((Z[k+2]-
Z[k+1])+(Z[k+1]-Z[k]));
    dVy1dZ:=(-3*Vy[i,j,k,2]+4*Vy[i,j,k+1,2]-Vy[i,j,k+2,2])/((Z[k+2]-
Z[k+1])+(Z[k+1]-Z[k]));
    dVz1dZ:=(-3*Vz[i,j,k,2]+4*Vz[i,j,k+1,2]-Vz[i,j,k+2,2])/((Z[k+2]-
Z[k+1])+(Z[k+1]-Z[k]));
    d2VxdZ2:=(-Vx[i,j,k+3,2]+4*Vx[i,j,k+2,2]-
5*Vx[i,j,k+1,2]+2*Vx[i,j,k,2])/((Z[k+3]-Z[k+2])*(Z[k+1]-Z[k]));
    d2VydZ2:=(-Vy[i,j,k+3,2]+4*Vy[i,j,k+2,2]-
5*Vy[i,j,k+1,2]+2*Vy[i,j,k,2])/((Z[k+3]-Z[k+2])*(Z[k+1]-Z[k]));
    d2VzdZ2:=(-Vz[i,j,k+3,2]+4*Vz[i,j,k+2,2]-
5*Vz[i,j,k+1,2]+2*Vz[i,j,k,2])/((Z[k+3]-Z[k+2])*(Z[k+1]-Z[k]));
end;
if ((k>=1) and (k<=Zc-1)) then
begin
    dVx1dZ:=(Vx[i,j,k+1,2]-Vx[i,j,k-1,2])/((Z[k+1]-Z[k])+(Z[k]-Z[k-1]));
    dVy1dZ:=(Vy[i,j,k+1,2]-Vy[i,j,k-1,2])/((Z[k+1]-Z[k])+(Z[k]-Z[k-1]));
    dVz1dZ:=(Vz[i,j,k+1,2]-Vz[i,j,k-1,2])/((Z[k+1]-Z[k])+(Z[k]-Z[k-1]));
    d2VxdZ2:=(Vx[i,j,k+1,2]-2*Vx[i,j,k,2]+Vx[i,j,k-1,2])/((Z[k+1]-Z[k])*(Z[k]-
Z[k-1]));
    d2VydZ2:=(Vy[i,j,k+1,2]-2*Vy[i,j,k,2]+Vy[i,j,k-1,2])/((Z[k+1]-Z[k])*(Z[k]-
Z[k-1]));
    d2VzdZ2:=(Vz[i,j,k+1,2]-2*Vz[i,j,k,2]+Vz[i,j,k-1,2])/((Z[k+1]-Z[k])*(Z[k]-
Z[k-1]));
end;

if k=Zc then
begin
    dVx1dZ:=(3*Vx[i,j,k,2]-4*Vx[i,j,k-1,2]+Vx[i,j,k-2,2])/((Z[k]-Z[k-1])+(Z[k-
1]-Z[k-2]));
    dVy1dZ:=(3*Vy[i,j,k,2]-4*Vy[i,j,k-1,2]+Vy[i,j,k-2,2])/((Z[k]-Z[k-1])+(Z[k-
1]-Z[k-2]));
    dVz1dZ:=(3*Vz[i,j,k,2]-4*Vz[i,j,k-1,2]+Vz[i,j,k-2,2])/((Z[k]-Z[k-1])+(Z[k-
1]-Z[k-2]));
    d2VxdZ2:=(2*Vx[i,j,k,2]-5*Vx[i,j,k-1,2]+4*Vx[i,j,k-2,2]-Vx[i,j,k-
3,2])/((Z[k]-Z[k-1])*(Z[k-2]-Z[k-3]));
    d2VydZ2:=(2*Vy[i,j,k,2]-5*Vy[i,j,k-1,2]+4*Vy[i,j,k-2,2]-Vy[i,j,k-
3,2])/((Z[k]-Z[k-1])*(Z[k-2]-Z[k-3]));
    d2VzdZ2:=(2*Vz[i,j,k,2]-5*Vz[i,j,k-1,2]+4*Vz[i,j,k-2,2]-Vz[i,j,k-
3,2])/((Z[k]-Z[k-1])*(Z[k-2]-Z[k-3]));
end;
if ((i<=N-1) and (j=0) and (i<>0)) then
begin
    A:=Abs(Abs(Y[i,j+1])-Abs(Y[i,j]));
    B:=Abs(Abs(Y[i,j+2])-Abs(Y[i,j+1]));
    C:=A+B;

```

```

if ((A<10e-10) and (X[i,j+1]<10e-10) and (X[i,j]>0)) then
  C:=A+B;
if ((A<10e-10) and (X[i,j+1]>0) and (X[i,j]<10e-10)) then
  C:=A+B;
if ((B<10e-10) and (X[i,j+2]<10e-10) and (X[i,j+1]>0)) then
  C:=A+B;
if ((B<10e-10) and (X[i,j+2]>0) and (X[i,j+1]<10e-10)) then
  C:=A+B;
if ((A<10e-10) and (Y[i,j+1]<10e-10) and (Y[i,j]>0)) then
  C:=2*Y[i,j]+B;
if ((A<10e-10) and (Y[i,j+1]>0) and (Y[i,j]<10e-10)) then
  C:=2*Y[i,j+1]+B;
if ((B<10e-10) and (Y[i,j+2]<10e-10) and (Y[i,j+1]>0)) then
  C:=A+2*Y[i,j+1];
if ((B<10e-10) and (Y[i,j+2]>0) and (Y[i,j+1]<10e-10)) then
  C:=A+2*Y[i,j+2];
dVx1dY:=(-3*Vx[i,j,k,2]+4*Vx[i,j+1,k,2]-Vx[i,j+2,k,2])/C;
dVy1dY:=(-3*Vy[i,j,k,2]+4*Vy[i,j+1,k,2]-Vy[i,j+2,k,2])/C;
dVz1dY:=(-3*Vz[i,j,k,2]+4*Vz[i,j+1,k,2]-Vz[i,j+2,k,2])/C;
A:=Abs(Abs(Y[i,j+3])-Abs(Y[i,j+2]));
B:=Abs(Abs(Y[i,j+1])-Abs(Y[i,j]));
C:=A*B;
if ((A<10e-10) and (X[i,j+3]<10e-10) and (X[i,j+2]>0)) then
  C:=B;
if ((A<10e-10) and (X[i,j+3]>0) and (X[i,j+2]<10e-10)) then
  C:=B;
if ((B<10e-10) and (X[i,j+1]<10e-10) and (X[i,j]>0)) then
  C:=A;
if ((B<10e-10) and (X[i,j+1]>0) and (X[i,j]<10e-10)) then
  C:=A;
if ((A<10e-10) and (Y[i,j+3]<10e-10) and (Y[i,j+2]>0)) then
  C:=2*Y[i,j+2]*B;
if ((A<10e-10) and (Y[i,j+3]>0) and (Y[i,j+2]<10e-10)) then
  C:=2*Y[i,j+3]*B;
if ((B<10e-10) and (Y[i,j+1]<10e-10) and (Y[i,j]>0)) then
  C:=A+2*Y[i,j];
if ((B<10e-10) and (Y[i,j+1]>0) and (Y[i,j]<10e-10)) then
  C:=A+2*Y[i,j+1];

d2VxdY2:=(-Vx[i,j+3,k,2]+4*Vx[i,j+2,k,2]-5*Vx[i,j+1,k,2])+2*Vx[i,j,k,2]/C;
d2VydY2:=(-Vy[i,j+3,k,2]+4*Vy[i,j+2,k,2]-5*Vy[i,j+1,k,2])+2*Vy[i,j,k,2]/C;
d2VzdY2:=(-Vz[i,j+3,k,2]+4*Vz[i,j+2,k,2]-5*Vz[i,j+1,k,2])+2*Vz[i,j,k,2]/C
end;
if ((i<=N-1) and (j>=1) and (j<=NumberOfCirclePoints[i]-1) and (i<>0)) then
begin
  A:=Abs(Abs(Y[i,j+1])-Abs(Y[i,j]));
  B:=Abs(Abs(Y[i,j])-Abs(Y[i,j-1]));
  C:=A+B;
  if ((A<10e-10) and (X[i,j+1]<10e-10) and (X[i,j]>0)) then
    C:=A+B;
  if ((A<10e-10) and (X[i,j+1]>0) and (X[i,j]<10e-10)) then
    C:=A+B;
  if ((B<10e-10) and (X[i,j]<10e-10) and (X[i,j-1]>0)) then
    C:=A+B;
  if ((B<10e-10) and (X[i,j]>0) and (X[i,j-1]<10e-10)) then
    C:=A+B;
  if ((A<10e-10) and (Y[i,j+1]<10e-10) and (Y[i,j]>0)) then
    C:=2*Y[i,j]+B;
  if ((A<10e-10) and (Y[i,j+1]>0) and (Y[i,j]<10e-10)) then
    C:=2*Y[i,j+1]+B;
  if ((B<10e-10) and (Y[i,j]<10e-10) and (Y[i,j-1]>0)) then

```

```

    C:=A+2*Y[i,j-1];
    if ((B<10e-10) and (Y[i,j]>0) and (Y[i,j-1]<10e-10)) then
        C:=A+2*Y[i,j];
        dVx1dY:=(Vx[i,j+1,k,2]-Vx[i,j-1,k,2])/C;
        dVy1dY:=(Vy[i,j+1,k,2]-Vy[i,j-1,k,2])/C;
        dVz1dY:=(Vz[i,j+1,k,2]-Vz[i,j-1,k,2])/C;
        A:=Abs(Abs(Y[i,j+1])-Abs(Y[i,j]));
        B:=Abs(Abs(Y[i,j])-Abs(Y[i,j-1]));
        C:=A*B;
        if ((A<10e-10) and (X[i,j+1]<10e-10) and (X[i,j]>0)) then
            C:=B;
        if ((A<10e-10) and (X[i,j+1]>0) and (X[i,j]<10e-10)) then
            C:=B;
        if ((B<10e-10) and (X[i,j]<10e-10) and (X[i,j-1]>0)) then
            C:=A;
        if ((B<10e-10) and (X[i,j]>0) and (X[i,j-1]<10e-10)) then
            C:=A;
        if ((A<10e-10) and (Y[i,j+1]<10e-10) and (Y[i,j]>0)) then
            C:=2*Y[i,j]*B;
        if ((A<10e-10) and (Y[i,j+1]>0) and (Y[i,j]<10e-10)) then
            C:=2*Y[i,j+1]*B;
        if ((B<10e-10) and (Y[i,j]<10e-10) and (Y[i,j-1]>0)) then
            C:=A+2*Y[i,j-1];
        if ((B<10e-10) and (Y[i,j]>0) and (Y[i,j-1]<10e-10)) then
            C:=A+2*Y[i,j];
        d2VxdY2:=(Vx[i,j+1,k,2]-2*Vx[i,j,k,2]+Vx[i,j-1,k,2])/C;
        d2Vydy2:=(Vy[i,j+1,k,2]-2*Vy[i,j,k,2]+Vy[i,j-1,k,2])/C;
        d2Vzdy2:=(Vz[i,j+1,k,2]-2*Vz[i,j,k,2]+Vz[i,j-1,k,2])/C
    end;
if ((i<=N) and (j=NumberOfCirclePoints[i]) and (i>0)) then
    begin
        A:=Abs(Abs(Y[i,j])-Abs(Y[i,j-1]));
        B:=Abs(Abs(Y[i,j-1])-Abs(Y[i,j-2]));
        C:=A+B;
        if ((A<10e-10) and (X[i,j]<10e-10) and (X[i,j-1]>0)) then
            C:=A+B;
        if ((A<10e-10) and (X[i,j]>0) and (X[i,j-1]<10e-10)) then
            C:=A+B;
        if ((B<10e-10) and (X[i,j-1]<10e-10) and (X[i,j-2]>0)) then
            C:=A+B;
        if ((B<10e-10) and (X[i,j-1]>0) and (X[i,j-2]<10e-10)) then
            C:=A+B;
        if ((A<10e-10) and (Y[i,j]<10e-10) and (Y[i,j-1]>0)) then
            C:=2*Y[i,j-1]+B;
        if ((A<10e-10) and (Y[i,j]>0) and (Y[i,j-1]<10e-10)) then
            C:=2*Y[i,j]+B;
        if ((B<10e-10) and (Y[i,j-1]<10e-10) and (Y[i,j-2]>0)) then
            C:=A+2*Y[i,j-2];
        if ((B<10e-10) and (Y[i,j-1]>0) and (Y[i,j-2]<10e-10)) then
            C:=A+2*Y[i,j-1];
        dVx1dY:=(3*Vx[i,j,k,2]-4*Vx[i,j-1,k,2]+Vx[i,j-2,k,2])/C;
        dVy1dY:=(3*Vy[i,j,k,2]-4*Vy[i,j-1,k,2]+Vy[i,j-2,k,2])/C;
        dVz1dY:=(3*Vz[i,j,k,2]-4*Vz[i,j-1,k,2]+Vz[i,j-2,k,2])/C;
        A:=Abs(Abs(Y[i,j])-Abs(Y[i,j-1]));
        B:=Abs(Abs(Y[i,j-2])-Abs(Y[i,j-3]));
        C:=A*B;
        if ((A<10e-10) and (X[i,j]<10e-10) and (X[i,j-1]>0)) then
            C:=B;
        if ((A<10e-10) and (X[i,j]>0) and (X[i,j-1]<10e-10)) then
            C:=B;
        if ((B<10e-10) and (X[i,j-2]<10e-10) and (X[i,j-3]>0)) then

```

```

C:=A;
if ((B<10e-10) and (X[i,j-2]>0) and (X[i,j-3]<10e-10)) then
  C:=A;
if ((A<10e-10) and (Y[i,j]<10e-10) and (Y[i,j-1]>0)) then
  C:=2*Y[i,j-1]*B;
if ((A<10e-10) and (Y[i,j]>0) and (Y[i,j-1]<10e-10)) then
  C:=2*Y[i,j]*B;
if ((B<10e-10) and (Y[i,j-2]<10e-10) and (Y[i,j-3]>0)) then
  C:=A+2*Y[i,j-3];
if ((B<10e-10) and (Y[i,j-2]>0) and (Y[i,j-3]<10e-10)) then
  C:=A+2*Y[i,j-2];
d2VxdY2:=(2*Vx[i,j,k,2]-5*Vx[i,j-1,k,2]+4*Vx[i,j-2,k,2]-Vx[i,j-3,k,2])/C;
d2VydY2:=(2*Vy[i,j,k,2]-5*Vy[i,j-1,k,2]+4*Vy[i,j-2,k,2]-Vy[i,j-3,k,2])/C;
d2VzdY2:=(2*Vz[i,j,k,2]-5*Vz[i,j-1,k,2]+4*Vz[i,j-2,k,2]-Vz[i,j-3,k,2])/C
end;
if ((i>=1) and (i<=N-1) and (j<=NumberOfCirclePoints[i-1])) then
begin
A:=Abs(Abs(X[i+1,j])-Abs(X[i,j]));
B:=Abs(Abs(X[i,j])-Abs(X[i-1,j]));
C:=A+B;
if ((A<10e-10) and (Y[i+1,j]<10e-10) and (Y[i,j]>0)) then
  C:=A+B;
if ((A<10e-10) and (Y[i+1,j]>0) and (Y[i,j]<10e-10)) then
  C:=A+B;
if ((B<10e-10) and (Y[i,j]<10e-10) and (Y[i-1,j]>0)) then
  C:=A+B;
if ((B<10e-10) and (Y[i,j]>0) and (Y[i-1,j]<10e-10)) then
  C:=A+B;
if ((A<10e-10) and (Y[i+1,j]<10e-10) and (Y[i,j]<10e-10)) then
  C:=10e20;
if ((B<10e-10) and (Y[i,j]<10e-10) and (Y[i-1,j]<10e-10)) then
  C:=10e20;
if ((A<10e-10) and (X[i+1,j]<10e-10) and (X[i,j]>0)) then
  C:=2*X[i,j]+B;
if ((A<10e-10) and (X[i+1,j]>0) and (X[i,j]<10e-10)) then
  C:=2*X[i+1,j]+B;
if ((B<10e-10) and (X[i,j]<10e-10) and (X[i-1,j]>0)) then
  C:=A+2*X[i-1,j];
if ((B<10e-10) and (X[i,j]>0) and (X[i-1,j-2]<10e-10)) then
  C:=A+2*X[i,j];
if ((A<10e-10) and (X[i+1,j]<10e-10) and (X[i,j]<10e-10)) then
  C:=10e20;
if ((B<10e-10) and (X[i,j]<10e-10) and (X[i-1,j]<10e-10)) then
  C:=10e20;
dVx1dX:=(Vx[i+1,j,k,2]-Vx[i-1,j,k,2])/C;
dVy1dX:=(Vy[i+1,j,k,2]-Vy[i-1,j,k,2])/C;
dVz1dX:=(Vz[i+1,j,k,2]-Vz[i-1,j,k,2])/C
end;
if ((i>=1) and (i<=N-2) and (j>NumberOfCirclePoints[i-1])) then
begin
A:=Abs(Abs(X[i+1,j])-Abs(X[i,j]));
B:=Abs(Abs(X[i+2,j])-Abs(X[i+1,j]));
C:=A*B;
if ((A<10e-10) and (Y[i+1,j]<10e-10) and (Y[i,j]>0)) then
  C:=B;
if ((A<10e-10) and (Y[i+1,j]>0) and (Y[i,j]<10e-10)) then
  C:=B;
if ((B<10e-10) and (Y[i+2,j]<10e-10) and (Y[i+1,j]>0)) then
  C:=A;
if ((B<10e-10) and (Y[i+2,j]>0) and (Y[i+1,j]<10e-10)) then
  C:=A;

```

```

if ((A<10e-10) and (Y[i+1,j]<10e-10) and (Y[i,j]<10e-10)) then
  C:=10e20;
if ((B<10e-10) and (Y[i+2,j]<10e-10) and (Y[i+1,j]<10e-10)) then
  C:=10e20;
if ((A<10e-10) and (X[i+1,j]<10e-10) and (X[i,j]>0)) then
  C:=2*X[i,j]*B;
if ((A<10e-10) and (X[i+1,j]>0) and (X[i,j]<10e-10)) then
  C:=2*X[i+1,j]*B;
if ((B<10e-10) and (X[i+2,j]<10e-10) and (X[i+1,j]>0)) then
  C:=A+2*X[i+1,j];
if ((B<10e-10) and (X[i+2,j]>0) and (X[i+1,j]<10e-10)) then
  C:=A+2*X[i+2,j];
if ((A<10e-10) and (X[i+1,j]<10e-10) and (X[i,j]<10e-10)) then
  C:=10e20;
if ((B<10e-10) and (X[i+2,j]<10e-10) and (X[i+1,j]<10e-10)) then
  C:=10e20;
dVx1dX:=(-3*Vx[i,j,k,2]+4*Vx[i+1,j,k,2]-Vx[i+2,j,k,2])/C;
dVy1dX:=(-3*Vy[i,j,k,2]+4*Vy[i+1,j,k,2]-Vy[i+2,j,k,2])/C;
dVz1dX:=(-3*Vz[i,j,k,2]+4*Vz[i+1,j,k,2]-Vz[i+2,j,k,2])/C
end;
if ((i>=N-2) and (j<=NumberOfCirclePoints[i-2])) then
begin
  A:=Abs(Abs(X[i,j])-Abs(X[i-1,j]));
  B:=Abs(Abs(X[i-1,j])-Abs(X[i-2,j]));
  C:=A+B;
  if ((A<10e-10) and (Y[i,j]<10e-10) and (Y[i-1,j]>0)) then
    C:=A+B;
  if ((A<10e-10) and (Y[i,j]>0) and (Y[i-1,j]<10e-10)) then
    C:=A+B;
  if ((B<10e-10) and (Y[i-1,j]<10e-10) and (Y[i-2,j]>0)) then
    C:=A+B;
  if ((B<10e-10) and (Y[i-1,j]>0) and (Y[i-2,j]<10e-10)) then
    C:=A+B;
  if ((A<10e-10) and (Y[i,j]<10e-10) and (Y[i-1,j]<10e-10)) then
    C:=10e20;
  if ((B<10e-10) and (Y[i-1,j]<10e-10) and (Y[i-2,j]<10e-10)) then
    C:=10e20;
  if ((A<10e-10) and (X[i,j]<10e-10) and (X[i-1,j]>0)) then
    C:=2*X[i-1,j]+B;
  if ((A<10e-10) and (X[i,j]>0) and (X[i-1,j]<10e-10)) then
    C:=2*X[i,j]+B;
  if ((B<10e-10) and (X[i-1,j]<10e-10) and (X[i-2,j]>0)) then
    C:=A+2*X[i-2,j];
  if ((B<10e-10) and (X[i-1,j]>0) and (X[i-1,j]<10e-10)) then
    C:=A+2*X[i-1,j];
  if ((A<10e-10) and (X[i,j]<10e-10) and (X[i-1,j]<10e-10)) then
    C:=10e20;
  if ((B<10e-10) and (X[i-1,j]<10e-10) and (X[i-2,j]<10e-10)) then
    C:=10e20;
  dVx1dX:=(3*Vx[i,j,k,2]-4*Vx[i-1,j,k,2]+Vx[i-2,j,k,2])/C;
  dVy1dX:=(3*Vy[i,j,k,2]-4*Vy[i-1,j,k,2]+Vy[i-2,j,k,2])/C;
  dVz1dX:=(3*Vz[i,j,k,2]-4*Vz[i-1,j,k,2]+Vz[i-2,j,k,2])/C
end;
if ((i>N-2) and (j>NumberOfCirclePoints[i-2])) then
begin
  C:=2*Abs(Abs(X[i,j])-Abs(X[i-1,j]));
  dVx1dX:=(Vx[i,j,k,2]+Vx[i+1,j,k,2]-Vx[i-1,j,k,2]-Vx[i-1,j-1,k,2])/C;
  dVy1dX:=(Vy[i,j,k,2]+Vy[i+1,j,k,2]-Vy[i-1,j,k,2]-Vy[i-1,j-1,k,2])/C;
  dVz1dX:=(Vz[i,j,k,2]+Vz[i+1,j,k,2]-Vz[i-1,j,k,2]-Vz[i-1,j-1,k,2])/C
end;
if ((i>=1) and (i<=N-1) and (j<=NumberOfCirclePoints[i-1])) then

```

```

begin
  A:=Abs(Abs(X[i+1,j])-Abs(X[i,j]));
  B:=Abs(Abs(X[i,j])-Abs(X[i-1,j]));
  C:=A*B;
  if ((A<10e-10) and (Y[i+1,j]<10e-10) and (Y[i,j]>0)) then
    C:=B;
  if ((A<10e-10) and (Y[i+1,j]>0) and (Y[i,j]<10e-10)) then
    C:=B;
  if ((B<10e-10) and (Y[i,j]<10e-10) and (Y[i-1,j]>0)) then
    C:=A;
  if ((B<10e-10) and (Y[i,j]>0) and (Y[i-1,j]<10e-10)) then
    C:=A;
  if ((A<10e-10) and (Y[i+1,j]<10e-10) and (Y[i,j]<10e-10)) then
    C:=10e20;
  if ((B<10e-10) and (Y[i,j]<10e-10) and (Y[i-1,j]<10e-10)) then
    C:=10e20;
  if ((A<10e-10) and (X[i+1,j]<10e-10) and (X[i,j]>0)) then
    C:=2*X[i,j]*B;
  if ((A<10e-10) and (X[i+1,j]>0) and (X[i,j]<10e-10)) then
    C:=2*X[i+1,j]*B;
  if ((B<10e-10) and (X[i,j]<10e-10) and (X[i-1,j]>0)) then
    C:=A+2*X[i-1,j];
  if ((B<10e-10) and (X[i,j]>0) and (X[i-1,j]<10e-10)) then
    C:=A+2*X[i,j];
  if ((A<10e-10) and (X[i+1,j]<10e-10) and (X[i,j]<10e-10)) then
    C:=10e20;
  if ((B<10e-10) and (X[i,j]<10e-10) and (X[i-1,j]<10e-10)) then
    C:=10e20;
  d2VxdX2:=(Vx[i+1,j,k,2]-2*Vx[i,j,k,2]+Vx[i-1,j,k,2])/C;
  d2VydX2:=(Vy[i+1,j,k,2]-2*Vy[i,j,k,2]+Vy[i-1,j,k,2])/C;
  d2VzdX2:=(Vz[i+1,j,k,2]-2*Vz[i,j,k,2]+Vz[i-1,j,k,2])/C;
end;
if ((i>=1) and (i<=N-3) and (j>NumberOfCirclePoints[i-1])) then
  begin
    A:=Abs(Abs(X[i+3,j])-Abs(X[i+2,j]));
    B:=Abs(Abs(X[i+1,j])-Abs(X[i,j]));
    C:=A*B;
    if ((A<10e-10) and (Y[i+3,j]<10e-10) and (Y[i+2,j]>0)) then
      C:=B;
    if ((A<10e-10) and (Y[i+3,j]>0) and (Y[i+2,j]<10e-10)) then
      C:=B;
    if ((B<10e-10) and (Y[i+1,j]<10e-10) and (Y[i,j]>0)) then
      C:=A;
    if ((B<10e-10) and (Y[i+1,j]>0) and (Y[i,j]<10e-10)) then
      C:=A;
    if ((A<10e-10) and (Y[i+3,j]<10e-10) and (Y[i+2,j]<10e-10)) then
      C:=10e20;
    if ((B<10e-10) and (Y[i+1,j]<10e-10) and (Y[i,j]<10e-10)) then
      C:=10e20;
    if ((A<10e-10) and (X[i+3,j]<10e-10) and (X[i+2,j]>0)) then
      C:=2*X[i+2,j]*B;
    if ((A<10e-10) and (X[i+3,j]>0) and (X[i+2,j]<10e-10)) then
      C:=2*X[i+3,j]*B;
    if ((B<10e-10) and (X[i+1,j]<10e-10) and (X[i,j]>0)) then
      C:=A+2*X[i,j];
    if ((B<10e-10) and (X[i+1,j]>0) and (X[i,j]<10e-10)) then
      C:=A+2*X[i+1,j];
    if ((A<10e-10) and (Y[i+3,j]<10e-10) and (Y[i+2,j]<10e-10)) then
      C:=10e20;
    if ((B<10e-10) and (Y[i+1,j]<10e-10) and (Y[i,j]<10e-10)) then
      C:=10e20;
  end;

```

```

d2VxdX2:=(-Vx[i+3,j,k,2]+4*Vx[i+2,j,k,2]-5*Vx[i+1,j,k,2]+2*Vx[i,j,k,2])/C;
d2VydX2:=(-Vy[i+3,j,k,2]+4*Vy[i+2,j,k,2]-5*Vy[i+1,j,k,2]+2*Vy[i,j,k,2])/C;
d2VzdX2:=(-Vz[i+3,j,k,2]+4*Vz[i+2,j,k,2]-5*Vz[i+1,j,k,2]+2*Vz[i,j,k,2])/C
end;
if (i=N)then
begin
dVx1dX:=0.0;          dVy1dX:=0.0;          dVz1dX:=0.0;
d2VxdX2:=0.0;          d2VydX2:=0.0;          d2VzdX2:=0.0;
dVx1dY:=0.0;          dVy1dY:=0.0;          dVz1dY:=0.0;
d2VxdY2:=0.0;          d2VydY2:=0.0;          d2VzdY2:=0.0;
dVx1dZ:=0.0;          dVy1dZ:=0.0;          dVz1dZ:=0.0;
d2VxdZ2:=0.0;          d2VydZ2:=0.0;          d2VzdZ2:=0.0
end;
A:=Sqrt(Sqr(X[i,j])+Sqr(Y[i,j]));
if (A<=Dbody)and(k>=StartZofBody)and(k<=FinalZofBody))then
begin
dVx1dX:=0.0;          dVy1dX:=0.0;          dVz1dX:=0.0;
d2VxdX2:=0.0;          d2VydX2:=0.0;          d2VzdX2:=0.0;
dVx1dY:=0.0;          dVy1dY:=0.0;          dVz1dY:=0.0;
d2VxdY2:=0.0;          d2VydY2:=0.0;          d2VzdY2:=0.0;
dVx1dZ:=0.0;          dVy1dZ:=0.0;          dVz1dZ:=0.0;
d2VxdZ2:=0.0;          d2VydZ2:=0.0;          d2VzdZ2:=0.0
end;
dP:=dVx1dX*dVy1dY-dVy1dX*dVx1dY+dVy1dY*dVz1dZ-dVy1dZ*dVz1dY;
P[i,j,k,2]:=P[i,j,k,1]+dP;
dVyVxdY:=( (3*Vy[i,j,k,2]-Vy[i,j,k,1])/2)*dVx1dY;
Vx[i,j,k,3]:=(4*Vx[i,j,k,2]-Vx[i,j,k,1])/3-2*dT*(dVyVxdY+d2VxdY2*Viscosity);
dVyVydY:=( (3*Vy[i,j,k,2]-Vy[i,j,k,1])/2)*dVy1dY;
Vy[i,j,k,3]:=(4*Vy[i,j,k,2]-Vy[i,j,k,1])/3-2*dT*(dVyVydY-
dP+d2VydY2*Viscosity);
dVyVzdY:=( (3*Vy[i,j,k,2]-Vy[i,j,k,1])/2)*dVz1dY;
Vz[i,j,k,3]:=(4*Vz[i,j,k,2]-Vz[i,j,k,1])/3-2*dT*(dVyVzdY+d2VzdY2*Viscosity);
V[i,j,k]:=Sqrt(Sqr(Vx[i,j,k,3])+Sqr(Vy[i,j,k,3])+Sqr(Vz[i,j,k,3]));
P[i,j,k,1]:=P[i,j,k,2];
Vx[i,j,k,1]:=Vx[i,j,k,2];
Vy[i,j,k,1]:=Vy[i,j,k,2];
Vz[i,j,k,1]:=Vz[i,j,k,2];
Vx[i,j,k,2]:=Vx[i,j,k,3];
Vy[i,j,k,2]:=Vy[i,j,k,3];
Vz[i,j,k,2]:=Vz[i,j,k,3]
end
end
end;

```