

Державне Підприємство «Конструкторське Бюро «Південне»
ім. М.К. Янгеля»

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

МІНАЙ ОЛЕКСАНДР МИКОЛАЙОВИЧ

УДК 629.7+621.454.2.046.4:532.631

ДИСЕРТАЦІЯ
«ЗАЛЕЖНІСТЬ ПРОЕКТНИХ ПАРАМЕТРІВ КАПЛЯРНИХ ЗАСОБІВ
ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СУЦІЛЬНОСТІ ПАЛИВА
ВІД ТЕРМІНУ ЇХ ЕКСПЛУАТАЦІЇ»

Спеціальність 134 – Авіаційна та ракетно-космічна техніка

Галузь знань 13 – Механічна інженерія

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень.

Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

О.М. Мінай

Науковий керівник:

Давидов Сергій Олександрович, доктор технічних наук, професор.

Дніпро – 2024

АНОТАЦІЯ

Мінай О.М. Залежність проектних параметрів капілярних засобів забезпечення суцільності палива від терміну їх експлуатації – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття вченого ступеня доктор філософії за спеціальністю 134 – Авіаційна та ракетно-космічна техніка у галузі знань 13 – Механічна інженерія – ДП «КБ «Південне», Дніпро, 2024.

Політ космічних літальних апаратів з тривалим терміном експлуатації та багаторазовим включенням рушійної установки: космічних станцій, космічних буксирів, телекомунікаційних супутників, космічних телескопів, дослідницьких зондів, тощо, характеризується чергуванням активних ділянок траєкторії, коли працює рушійна установка, та пасивних ділянок, на яких рідинні компоненти палива в баках знаходяться під впливом невагомості (мікрогравітації) і внаслідок різноманітних збурюючих факторів можуть займати в них будь-яке положення. Для забезпечення нормального функціонування рушійної установки, зокрема і в умовах мікрогравітації, на вході до витратної магістралі встановлюють спеціальні засоби забезпечення суцільності палива. При цьому не виключена ситуація, коли газова фаза потрапить до засобу забезпечення суцільності палива, а звідти до витратної магістралі, що в подальшому може привести до зриву повторного запуску рушійної установки і аварійному завершенню місії.

У такому випадку, умовою забезпечення суцільності компонентів палива на вході у рушійну установку стає запобігання потраплянню газової фази в об'єм компонента палива, який розташовано в районі засобу забезпечення суцільності палива, та безпосередньо в ньому, у період запуску і подальшої праці двигуна.

Однією із систем, що ефективно забезпечують подачу компоненту палива на вхід до рушійної установки без наявності в ньому газової фази, та можливість її багаторазового запуску в умовах невагомості (мікрогравітації), є капілярні засоби забезпечення суцільності палива.

Основним функціональним елементом таких систем є капілярний розділювач фаз, функціонування якого заснована на використанні сили поверхневого натягу рідини. Існування капілярного перепаду тиску при переході через поверхню розподілу фаз забезпечує утримання палива у визначеному місці баку.

Найчастіше роль основного, або допоміжного капілярного розділювача фаз у різних типах капілярних забірних пристроїв виконують металеві ткані сітки з чарунками мікронних розмірів, які у цьому випадку називають – сітчастими розділювачами фаз.

До основного проектного параметра сітчастого розділювача фаз належить капілярна утримуюча здатність. Вона відповідає за максимальний перепад статичного тиску, за якого не відбувається проникнення крізь чарунки сітки газової фази. При проектуванні капілярну утримуючу здатність намагаються максимізувати, але таким чином, щоб гідравлічні втрати тиску при протіканні компоненту палива крізь сітчастий розділювач фаз, навпаки, були мінімальними.

У космічних літальних апаратів з тривалим терміном експлуатації під впливом дії агресивних палив, що перебувають в паливних баках, наприклад: азотного тетроксиду та несиметричного диметилгідрозину, капілярна утримуюча здатність сітчастих розділювачів фаз може змінюватися. Причинами цього є зменшення діаметрів дротів сітки, утворення на поверхні дроту плівок, гелів, опадів внаслідок корозійних процесів. Це призводить до того, що при тривалому впливі агресивних палив та їх парів на конструкційні матеріали сіток відбувається зміна геометричних розмірів дроту та чарунок сітки, а також можлива зміна величини контактного куту змочування палива з матеріалом сітки. В сукупності все це може сприяти критичному зниженню капілярної утримуючої здатності.

Пори дрібночарункових сіток мають дуже складну форму, що не дозволяє визначити капілярну утримуючу здатність сітчастих розділювачів фаз розрахунковим шляхом. Перспективним напрямком у підвищенні

досконалості, ефективності, та надійності експлуатації конструкцій капілярних засобів забезпечення суцільності палива є визначення впливу тривалого зберігання сітчастих розділювачів фаз у компонентах та під парами рідких ракетних палив: азотного тетроксиду та несиметричного диметилгідразину на зміну їх основного проектного параметру – капілярної утримуючої здатності шляхом її експериментального дослідження.

Таким чином, встановлення закономірностей зміни проектних параметрів сітчастих розділювачів фаз в залежності від терміну дії на їх конструкційні матеріали компонентів рідких ракетних палив: азотного тетроксиду та несиметричного диметилгідразину і створення методики їх розрахунку та проектування, є актуальною та своєчасною науковою задачею.

У роботі вирішено важливе актуальне завдання по врахуванню закономірностей зміни капілярної утримуючої здатності сітчастих розділювачів фаз протягом тривалого терміну їх експлуатації і удосконалення методик визначення параметрів капілярних засобів забезпечення суцільності палива з урахуванням тривалого терміну дії на них компонентів рідкого ракетного палива: азотного тетроксиду та несиметричного диметилгідразину.

Уточнено залежність швидкості корозії основного конструкційного матеріалу сітчастого розділювача фаз (на прикладі сітки зі сталі марки 12X18H10T саржевого типу плетіння № 008 з квадратною чарункою у світлі) від терміну їх перебування в хімічно агресивних компонентах палива (азотному тетроксиді та несиметричному диметилгідразині) і під їх парами.

Вперше виявлено, що корозія сталі 12X18H10T у газовій фазі азотного тетроксиду та несиметричного диметилгідразину протікає $\sim 1,5$ рази швидше, ніж у рідкій. У середньому вона, майже у 2 рази перевищує відоме теоретичне значення, яке дорівнює $1 \cdot 10^{-4}$ мм на рік. Складає $1,91 \cdot 10^{-4}$ для азотного тетроксиду та $2,13 \cdot 10^{-4}$ для несиметричного диметилгідразину, що еквівалентно збільшенню розміру чарунок (на 31 рік експлуатації) з

номінального значення у 80 мкм до 91,8 мкм (для азотного тетроксиду) та 93,2 мкм (для несиметричного диметилгідрозину).

Виявлено закономірності процесу втрати капілярної утримуючої здатності внаслідок порушення рівноваги зовнішніх та внутрішніх сил на поверхні розподілу фаз «рідина-газ» капіляру в чарунці сітки, що залежать від терміну перебування конструкційного матеріалу сітки в компонентах палива, фази (рідка чи газова) і типу компоненту (азотний тетроксид чи несиметричний диметилгідрозин). Отримано графіки лінійної регресії зміни значень капілярної утримуючої здатності сітчастих розділювачів фаз за часом. Максимальне зниження капілярної утримуючої здатності отримано для сталевих сіток № 008, які впродовж 31 року перебували під впливом парів азотного тетроксиду та несиметричного диметилгідрозину: 11% (для азотного тетроксиду) і 23% (для несиметричного диметилгідрозину).

Вперше отримано, що у разі тривалого терміну перебування конструкційного матеріалу сітки № 008 в газовій фазі несиметричного диметилгідрозина (31 рік), внаслідок адгезійних процесів на поверхні металу з часом відбувається поступове збільшення контактного кута змочування θ з 0° до 25° .

Отримано нові (більш точні) коефіцієнти для напівемпіричної математичної моделі критичного числа Бонда, що суттєво підвищує точність визначення основних параметрів сітчастих розділювачів фаз при проектуванні капілярних засобів забезпечення суцільності палива.

Подальшого вдосконалення отримали математичні моделі визначення проектних параметрів капілярних засобів забезпечення суцільності палива за рахунок вводу до них змінної складової – функції часу.

На основі визначених при науково-експериментальних дослідженнях закономірностей розраховано коефіцієнти максимальної швидкості корозії, застосування яких вдосконалює інженерні методики розрахунків основних параметрів сітчастих розділювачів фаз капілярних засобів забезпечення суцільності палива під час їх проектування.

Розроблені інженерні методики розрахунку основних проектних параметрів сітчастих розділювачів фаз капілярних засобів забезпечення суцільності палива з тривалим терміном експлуатації, а саме:

- статичної капілярної утримуючої здатності;
- динамічної капілярної утримуючої здатності;
- гідравлічного опору.

Використовуючи удосконалений підхід до визначення основних проектних параметрів сітчастих розподілювачів фаз капілярних засобів забезпечення суцільності палива з тривалим терміном експлуатації у хімічно агресивних компонентах палива (азотному тетроксиді та несиметричному диметилгідразині) і під їх парами, можливо оперативно та з більшою точністю, ніж це було раніше, визначити: статичну і динамічну капілярну утримуючу здатність, еквівалентний капілярний діаметр пор, коефіцієнт гідравлічного опору і мінімально потрібну площу змоченої поверхні сітчастого розділювача фаз, застосовувати оптимальні значення коефіцієнтів запасу і підібрати оптимальний типорозмір сітки ще на етапі ескізного проектування, що дозволить оптимізувати обрану конструкцію і зробити її більш надійною.

Використання удосконалених методик вибору основних проектних параметрів сітчастих розподілювачів фаз капілярних засобів забезпечення суцільності палива з тривалим терміном експлуатації у хімічно агресивних компонентах палива (азотному тетроксиді та несиметричному диметилгідразині) і під їх парами, дозволяє зменшити кількість експериментальних випробувань (або відмовитись від них взагалі) і, тим самим, зменшити загальні часові та матеріально технічні витрати при виконанні проектних робіт.

Розроблені інженерні методики дозволяють при проектуванні капілярних засобів забезпечення суцільності палива з тривалим терміном експлуатації визначити: статичну і динамічну капілярну утримуючу здатність, еквівалентний капілярний діаметр пор, коефіцієнт гідравлічного

опору і мінімально потрібну площу змоченої поверхні сітчастого розділювача фаз, застосовувати оптимальні значення коефіцієнтів запасу і підібрати оптимальний типорозмір сітки без проведення додаткового експериментального відпрацювання.

Результати дисертаційної роботи у вигляді методик розрахунку основних проектних параметрів сітчастих розділювачів фаз капілярних засобів забезпечення суцільності палива з тривалим терміном експлуатації впроваджено у виробничій процес ДП «КБ «Південне» ім. М.К. Янгеля під час виконання робіт з розробки перспективних космічних літальних апаратів та їх окремих систем, а також впроваджено в навчальний процес підготовки фахівців ракетно-космічного профілю Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара МОН України, що підтверджено відповідними актами впровадження.

Результати дисертаційної роботи, а саме математичні моделі, методики та рекомендації, було використано під час розрахунків з визначення гідродинамічних характеристик сітчастих елементів при проектуванні систем забезпечення суцільності компонентів палива у невагомості в баках розгінних ракетних блоків ракет-носіїв «Дніпро», «Циклон» та перспективних космічних літальних апаратів.

Ключові слова: багаторазові космічні системи, ракета-носіїв, рідинний ракетний двигун, мікрогравітація, паливні баки, ракетні палива, капілярні засоби забезпечення суцільності палива, сітчастий розподілювач фаз, капілярна утримуюча здатність, неруйнівний контроль, мікроструктура, інфрачервона спектроскопія, кристалічна решітка, нормальний розподіл, густина розподілу, коефіцієнт запасу.

ABSTRACT

Minai O. M. The dependence of the design parameters of capillary means of ensuring the integrity of the fuel on the term of their operation – Qualification scientific work on the rights of the manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in specialty 134 – Aviation and rocket-space engineering in the field of knowledge 13 – Mechanical engineering – Yuzhnoye State Design Office, Dnipro, 2024.

The flight of space aircraft with a long service life and multiple activation of the propulsion system: space stations, space tugs, telecommunication satellites, space telescopes, research probes, etc., is characterized by alternating active sections of the trajectory, when the propulsion system is operating, and passive sections, on which liquid components fuel in the tanks are under the influence of weightlessness (microgravity) and due to various disturbing factors can occupy any position in them. To ensure the normal functioning of the propulsion system, in particular, in microgravity conditions, special means of ensuring the integrity of the fuel are installed at the entrance to the flow line. At the same time, a situation is not excluded when the gas phase will get to the means of ensuring the integrity of the fuel, and from there to the consumption line, which may subsequently lead to a failure of the re-start of the propulsion system and an emergency termination of the mission.

In this case, the condition for ensuring the integrity of the fuel components at the entrance to the engine is to prevent the gas phase from entering the volume of the fuel component, which is located in the area of the means for ensuring the integrity of the fuel, and directly in it, during the start-up and subsequent operation of the engine.

One of the systems that effectively ensure the supply of the fuel component to the entrance to the propulsion system without the presence of a gas phase in it, and the possibility of its multiple launch in conditions of weightlessness (microgravity), are capillary means of ensuring the integrity of the fuel.

The main functional element of such systems is a capillary phase separator, the functioning of which is based on the use of the surface tension of the liquid. The existence of a capillary pressure drop when passing through the surface of the phase distribution ensures that the fuel is kept in a certain place in the tank.

Most often, the role of the main or auxiliary capillary phase separator in various types of capillary intake devices is performed by metal woven meshes with micron-sized cells, which in this case are called mesh phase separators.

The main design parameter of the mesh phase separator is the capillary retention capacity. It is responsible for the maximum static pressure drop, at which gas phase does not penetrate through the grid cells. When designing, they try to maximize the capillary retention capacity, but in such a way that the hydraulic pressure losses during the flow of the fuel component through the mesh phase separator, on the contrary, are minimal.

In spacecraft with a long service life under the influence of aggressive fuels in the fuel tanks, for example: nitrogen tetroxide and unsymmetrical dimethylhydrazine, the capillary retention capacity of mesh phase separators can change. The reasons for this are a decrease in the diameters of the mesh wires, the formation of films, gels, and precipitates on the surface of the wire due to corrosion processes. This leads to the fact that with long-term exposure of aggressive fuels and their vapors to the construction materials of the grids, there is a change in the geometric dimensions of the wire and cells of the grid, as well as a possible change in the contact angle of fuel wetting with the grid material. Together, all this can contribute to a critical decrease in capillary retention capacity.

The pores of fine meshes have a very complex shape, which makes it impossible to determine the capillary retention capacity of mesh phase separators by calculation. A promising direction in improving the perfection, efficiency, and reliability of the operation of the structures of capillary means of ensuring the integrity of the fuel is to determine the effect of long-term storage of mesh phase separators in components and under vapors of liquid rocket fuels: nitrogen

tetroxide and asymmetric dimethylhydrazine on the change of their main design parameter - the capillary retention capacity by her experimental research.

Thus, establishing the patterns of changes in the design parameters of mesh phase separators depending on the duration of action of liquid rocket fuel components: nitrogen tetroxide and unsymmetrical dimethylhydrazine on their structural materials and creating a methodology for their calculation and design is an urgent and timely scientific task.

The work solves an important topical task of taking into account the patterns of changes in the capillary retention capacity of mesh phase separators during the long term of their operation and improving the methods of determining the parameters of capillary means of ensuring fuel integrity, taking into account the long term of action of liquid rocket fuel components on them: nitrogen tetroxide and unsymmetrical dimethylhydrazine.

The dependence of the rate of corrosion of the main structural material of the mesh phase separator (on the example of a mesh made of steel grade 12X18H10T of twill weaving type No. 008 with a square shell in the light) on the duration of their stay in chemically aggressive fuel components (nitrogen tetroxide and unsymmetrical dimethylhydrazine) and under their vapors has been specified.

It was discovered for the first time that the corrosion of 12X18N10T steel in the gas phase of nitrogen tetroxide and unsymmetrical dimethylhydrazine proceeds ~ 1.5 times faster than in the liquid phase. On average, it is almost 2 times higher than the known theoretical value, which is equal to $1 \cdot 10^{-4}$ mm per year. It is $1,91 \cdot 10^{-4}$ for nitrogen tetroxide and $2,13 \cdot 10^{-4}$ for unsymmetrical dimethylhydrazine, which is equivalent to an increase in cell size (for 31 years of operation) from the nominal value of 80 μm to 91,8 μm (for nitrogen tetroxide) and 93,2 μm (for unsymmetrical dimethylhydrazine).

The regularities of the process of loss of capillary retention capacity due to the disturbance of the balance of external and internal forces on the surface of the distribution of the "liquid-gas" phases of the capillary in the grid cell, which depend on the residence time of the structural material of the grid in the fuel

components, the phase (liquid or gas) and the type of component (nitrogen tetroxide or unsymmetrical dimethylhydrazine). Graphs of linear regression of changes in capillary retention capacity of mesh phase separators over time were obtained. The maximum decrease in capillary retention capacity was obtained for steel meshes No. 008, which were exposed to nitrogen tetroxide and asymmetric dimethylhydrazine vapors for 31 years: 11% (for nitrogen tetroxide) and 23% (for unsymmetrical dimethylhydrazine).

For the first time, it was found that in the case of a long period of stay of the construction material of grid No. 008 in the gas phase of unsymmetric dimethylhydrazine (31 years), as a result of adhesion processes on the surface of the metal, there is a gradual increase in the wetting contact angle θ from 0° to 25° .

New (more accurate) coefficients were obtained for the semi-empirical mathematical model of the critical Bond number, which significantly increases the accuracy of determining the main parameters of mesh phase separators in the design of capillary means of ensuring fuel integrity.

Mathematical models for determining the design parameters of capillary means of ensuring fuel integrity were further improved by introducing a variable component into them - the function of time.

On the basis of the regularities determined during scientific and experimental studies, the coefficients of the maximum corrosion rate were calculated, the application of which improves the engineering methods of calculating the main parameters of mesh phase separators of capillary means of ensuring fuel integrity during their design.

Developed engineering methods for calculating the main design parameters of mesh phase separators of capillary means of ensuring the integrity of fuel with a long service life, namely:

- static capillary retention capacity;
- dynamic capillary retention capacity;
- hydraulic resistance.

Using an improved approach to determining the main design parameters of mesh phase distributors of capillary means of ensuring fuel integrity with a long service life in chemically aggressive fuel components (nitrogen tetroxide and unsymmetrical dimethylhydrazine) and under their vapors, it is possible to determine quickly and with greater accuracy than it was before : static and dynamic capillary retention capacity, equivalent capillary pore diameter, coefficient of hydraulic resistance and the minimum required area of the wetted surface of the mesh phase separator, apply the optimal values of the reserve coefficients and choose the optimal standard size of the mesh even at the stage of sketch design, which will allow to optimize the selected design and make it more reliable.

The use of improved methods for selecting the main design parameters of grid phase distributors of capillary means of ensuring fuel integrity with a long service life in chemically aggressive fuel components (nitrogen tetroxide and unsymmetrical dimethylhydrazine) and under their vapors allows to reduce the number of experimental tests (or to abandon them altogether) and, thus, to reduce the overall time and material and technical costs in the execution of project works.

The developed engineering methods make it possible to determine: static and dynamic capillary retention capacity, equivalent capillary pore diameter, coefficient of hydraulic resistance and the minimum required area of the wetted surface of the mesh phase separator when designing capillary means for ensuring the integrity of fuel with a long service life, to apply the optimal values of the reserve coefficients and to choose the optimal grid size without additional experimental testing.

The results of the dissertation work in the form of methods for calculating the main design parameters of mesh phase separators of capillary means of ensuring the integrity of fuel with a long service life have been implemented into the production process of the Yuzhnoye State Design Office named after M.K. Yangel during work on the development of promising space aircraft and their individual systems, as well as implemented in the educational process of training

specialists in the rocket and space profile of the Dnipro National University named after Oles Honchar of the Ministry of Education and Science of Ukraine, which was confirmed by the relevant acts of implementation.

The results of the dissertation work, namely mathematical models, methods and recommendations, were used during calculations to determine the hydrodynamic characteristics of mesh elements in the design of systems for ensuring the integrity of fuel components in weightlessness in the tanks of booster rocket blocks of the “Dnipro”, “Cyclone” and promising spacecraft.

Keywords: reusable space systems, launch vehicle, liquid rocket engine, microgravity, fuel tanks, rocket propellants, capillary means of fuel integrity, mesh phase separator, capillary retention capacity, non-destructive testing, microstructure, infrared spectroscopy, crystal lattice, normal distribution, distribution density, margin ratio.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати

Статті, опубліковані в періодичних виданнях, проіндексованих у базах Scopus та/або Web of Science або включених до категорії «А» Переліку наукових фахових видань України:

1. **Minai O.** Influence of long-term stays of elements of capillary intake devices in liquid propellant components on their parameters / O. Minai, O. Ivanov, I. Sedykh // Aerospace Research in Bulgaria. – Sofia, 2020. – Vol. 32. – P. 175-192. <https://doi.org/10.3897/arb.v32.e15> (Індексована *Web of Science*), [in English].

2. **Minai O.** Choice of the optimum design of lateral PMD using the CFD method / O. Minai, I. Kuzmich // Aerospace Research in Bulgaria. – Sofia, 2023. – Vol. 35. – P. 128-144. <https://doi.org/10.3897/arb.v35.e13> (Індексована *Web of Science*), [in English].

3. **Мінай О.М.** Класифікація, основні типи конструкцій та призначення капілярних засобів забезпечення суцільності палива / О.М. Мінай // Космічна наука і технологія. – Київ, 2024. – Т. 30, № 1 (146). – С. 14-30. <https://doi.org/10.15407/knit2024.01.014> (Індексована *Web of Science, SCOPUS*) [in Ukrainian].

Статті у наукових виданнях, включених до Переліку наукових фахових видань України:

4. **Минай А.Н.** Применение методов численного моделирования при экспериментальной отработке заборных устройств центрального типа / А.Н. Минай, И.В. Седых, И.Ю. Кузьмич // Авіаційно-космічна техніка і технологія. – Харків, 2019. – №6 (158). – С. 33-41. <https://doi.org/10.32620/aktt.2019.6.05> (Індексована *Google Scholar, Index Copernicus, CiteFactor*), [in Russian].

5. Седых И.В. Экспериментальное определение времени осаждения топлива в сферическом баке перед повторным включением маршевого двигателя / И.В. Седых, Д.С. Назаренко, **А.Н. Минай**, Я.О. Бабийчук // Системне проектування та аналіз характеристик аерокосмічної техніки: зб.

наук. пр. – Дніпро, 2019. – Том XXVII. – С. 136-144.
<https://doi.org/10.15421/471933> (Індексована *GoogleScholar*), [in Russian].

6. Кузьміч І.Ю. Вибір оптимальної конструкції забірною пристрою у баку пального першого ступеню ракети-носія «Циклон-4» / І.Ю. Кузьміч, **О.М. Мінай** // Авіаційно-космічна техніка й технологія. – Харків, 2022. – №1 (177). – С. 25-33. <https://doi.org/10.32620/aktt.2022.1.03> (Індексована *Google Scholar, Index Copernicus, CiteFactor*), [in Ukrainian].

7. **Мінай О.М.** Зміна капілярної утримної здатності засобів забезпечення суцільності палива в наслідок їх тривалого терміну експлуатації / О.М. Мінай // Вісник ДНУ. Серія: ракетно-космічна техніка, зб. наук. пр. Дніпропетровського національного університету ім. Олеса Гончара. – Т XXXI – Дніпро, 2023. – С. 58-73. <https://doi.org/10.15421/452306> (Індексована *Google Scholar*), [in Ukrainian].

8. **Мінай О.М.** Експериментальне визначення зміни капілярної утримної здатності сітчастих розділювачів фаз / О.М. Мінай // Авіаційно-космічна техніка й технологія. – Харків, 2023. – № 6 (192). – С. 55-65. <https://doi.org/10.32620/aktt.2023.6.07> (Індексована *Google Scholar, Index Copernicus, CiteFactor*), [in Ukrainian].

9. **Мінай О.М.** Визначення швидкості корозії основного конструкційного матеріалу сіток капілярних розділювачів фаз / О.М. Мінай // Авіаційно-космічна техніка й технологія. – Харків, 2024. – № 1 (193). – С. 43-55. <https://doi.org/10.32620/aktt.2024.1.04> (Індексована *Google Scholar, Index Copernicus, CiteFactor*), [in Ukrainian].

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

10. **Минай А.Н.** Применение методов численного моделирования при экспериментальной отработке заборных устройств баков ракет-носителей с центральным отбором компонентов топлива / А.Н. Минай, И.В. Седых, И.Ю. Кузьмич // Сучасні розрахунково-експериментальні методи

визначення характеристик ракетно-космічної техніки: науково-практична конф. – Дніпро, 2019. – С. 29-30.

11. Сєдих І.В. Визначення впливу числа Бонда на рух рідини при виконанні маневру переорієнтації за допомогою чисельного моделювання / І.В. Сєдих, **О.М. Мінай** // II Міжнародній науково-технічній конференції «Динаміка, міцність та моделювання в машинобудуванні» – Харків, 05 – 08 жовтня 2020 р. – С. 272-276.

12. Siedykh I.V. Reorientation of fuel components to ensure restarting of the main engine: calculation methods, numerical simulation and experimental testing/ I.V. Siedykh, **O.M. Minai** // 71-st International Astronautical Congress. 12 – 14 October, 2020, London – Technical Presentation and Conference Paper IAC–20,A2,3,5. – 10 p.

13. **Minai O.M.** Using mathematical modeling with experimental validation for the development of propellant continuity assurance equipment/ O.M. Minai // 72-st International Astronautical Congress, 25 – 29 October, 2021, Dubai – Technical Presentation and Conference Paper IAC– 21,A2,2,11. – 10 p.

14. **Мінай О.М.** Визначення динамічної складової гідравлічного залишку за допомогою методів чисельного моделювання / О.М. Мінай, Р.М. Петренко // Людина і космос: зб. тез XXIV Міжнарод. молодіж. наук.-практ. конф., 25–27 квітня 2022 р. – Дніпропетровськ, 2022: збірник тез. – Дніпро, 2022. – С. 139.

15. **Мінай О.М.** Застосування методів CFD моделювання при оптимізації конструкції забірних пристроїв у паливних баках ракет-носіїв / О.М. Мінай, І.Ю. Кузьміч // Авіація в XXI столітті: зб. тез X Всесвітній конгрес – «Безпека в авіації та космічні технології», 28 – 30 вересня 2022 р. – Київ, 2022: збірник тез. Київ, 2022. – С. 1-5.

16. Смоленський Д.Е. Числове моделювання процесу зливу компонентів палива з баку / Д.Е. Смоленський, **О.М. Мінай**, О.Г. Гоман // Комп'ютерна гідромеханіка: зб. тез VIII Міжнар. наук.-практич. конф., 27-28 вересня 2022 р. – Київ, 2022: збірник тез. Київ, 2022. – С. 78.

17. **Мінай О.М.** Вплив на капілярну утримну здатність сітчастих роздільників фаз їх тривалого перебування у компонентах ракетного палива / О.М. Мінай // Людина і космос: зб. тез XXV Міжнарод. молодіж. наук.-практ. конф., 12–14 квітня 2023 р. – Дніпропетровськ, 2023: збірник тез. – Дніпро, 2023. – С. 122-123.

18. **Minai O.M.** Prediction of performance of mesh phase separators in GEO satellite capillary intake devices / O.M. Minai // 74-st International Astronautical Congress. 02 – 06 October, 2023, Baku – Technical Presentation and Conference Paper IAC – 23,A2,4,4x76632 – 10 p.

19. **Мінай О.М.** Проблематика реализации космических проектов с применением криогенных двигательных установок многократного запуска / О.М. Мінай // Матеріали XVI наукових читань «Дніпровська орбіта – 2021» – Дніпро, 28 – 30 жовтня 2021 р. С. – 114-122.

20. Кузьміч І.Ю. Влияние диджитализации на процессы проектирования и экспериментальной отработки в ракетно-космической отрасли на примере капиллярного заборного устройства / І.Ю. Кузьміч, **О.М. Мінай** // Матеріали XVI наукових читань «Дніпровська орбіта – 2021» – Дніпро, 28 – 30 жовтня 2021 р. С. – 162-169.

21. **Мінай О.М.** Швидкість корозійних процесів та їх вплив на зміну структурних і геометричних параметрів сітчастих розділювачів фаз / О.М. Мінай // Космічні горизонти: зб. тез 3-ї наук.-практ. інтер.-конф. Випуск №2, Дніпро, 2023. – С. 36-40.

Праці, які додатково відображають наукові результати дисертації (підтверджують практичне застосування матеріалів дисертації):

22. Исследование параметров сетчатых фазоразделителей после длительного пребывания в рабочих жидкостях. Днепр-ПСХ 35.21.18220.216 ОТ: техн. отчет. – Днепр: ГП «КБ «Южное». 2016. 53 с.

23. Разработка средств обеспечения сплошности, обеспечивающих многократный запуск ДУ на низкокипящих КТ в условиях орбитального полета. НТРП.216/174-2021 ОТ: техн. отчет. – Днепр: ГП «КБ «Южное». 2021. 76 с.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	21
ВСТУП.....	23
РОЗДІЛ 1. КАПІЛЯРНІ ЗАСОБИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СУЦІЛЬНОСТІ ПАЛИВА. МЕТА, ЗАВДАННЯ Й МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	32
1.1. Призначення та основні типи конструкцій капілярних засобів забезпечення суцільності палива.....	34
1.2. Основні проектні параметри сітчастих розділювачів фаз та вплив на них терміну експлуатації.....	50
1.3. Висновки за розділом 1.....	74
РОЗДІЛ 2. ВИЗНАЧЕННЯ ШВИДКОСТІ КОРОЗІЇ ОСНОВНОГО КОНСТРУКЦІЙНОГО МАТЕРІАЛУ СІТЧАСТИХ РОЗДІЛЮВАЧІВ ФАЗ.....	76
2.1. Корозія металів, класифікація корозійних процесів.....	76
2.2. Конструкція та основний конструкційний матеріал сітчастих розділювачів фаз.....	80
2.3. Аналіз хімічного складу речовин, що знаходяться на поверхні зразків сіток сітчастих розділювачів фаз.....	88
2.3.1. Результати аналізу хімічного складу речовин, що знаходяться на поверхні зразків сіток сітчастих розділювачів фаз, вилучених з баку окислювача.....	89
2.3.2. Результати аналізу хімічного складу речовин, що знаходяться на поверхні зразків сіток сітчастих розділювачів фаз, вилучених з баку пального.....	91
2.4. Аналіз впливу різноманітних факторів на швидкість корозії.....	92
2.5. Проведення металографічних досліджень зразків сіток сітчастих розділювачів фаз на наявність корозії.....	96

2.6. Вимірювання геометричних розмірів зразків сіток сітчастих розділювачів фаз оптичним методом.....	103
2.7. Висновки за розділом 2.....	123
РОЗДІЛ 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ВИЗНАЧЕННЯ ЗМІНИ КАПІЛЯРНОЇ УТРИМУЮЧОЇ ЗДАТНОСТІ СІТЧАСТИХ РОЗДІЛЮВАЧІВ ФАЗ В ПРОЦЕСІ ДОВГОТРИВАЛОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ.....	
3.1. Об'єкт, предмет, методи дослідження та обладнання.....	126
3.2. Послідовність проведення експериментальних випробувань по визначенню капілярної утримуючої здатності.....	131
3.3. Результати експериментальних випробувань з визначення капілярної утримуючої здатності сітчастих розділювачів фаз.....	133
3.4. Аналіз результатів експериментальних випробувань з визначення капілярної утримуючої здатності сітчастих розділювачів фаз.....	136
3.5. Висновки за розділом 3.....	154
РОЗДІЛ 4. ІНЖЕНЕРНА МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ ОСНОВНИХ ПРОЕКТНИХ ПАРАМЕТРІВ КАПІЛЯРНИХ РОЗДІЛЮВАЧІВ ФАЗ З ТРИВАЛИМ ТЕРМІНОМ ЕКСПЛУАТАЦІЇ.....	
4.1. Методика розрахунку статичної капілярної утримуючої здатності сітчастих розділювачів фаз з тривалим терміном експлуатації.....	155
4.2. Методика розрахунку динамічної капілярної утримуючої здатності сітчастих розділювачів фаз з тривалим терміном експлуатації.....	158
4.2.1. Визначення коефіцієнта запасу по динамічній капілярній утримуючій здатності сітчастих розділювачів фаз з тривалим терміном експлуатації.....	161

4.3. Методика розрахунку гідравлічного опору сітчастого розділювача фаз з тривалим терміном експлуатації.....	166
4.4. Висновки за розділом 4.....	168
ВИСНОВКИ.....	170
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ.....	173
ДОДАТОК А. ДОКУМЕНТИ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ.....	197
ДОДАТОК Б. РЕЗУЛЬТАТИ ВИМІРЮВАННЯ ГЕОМЕТРИЧНИХ РОЗМІРІВ ЗРАЗКІВ СІТОК СІТЧАСТИХ РОЗДІЛЮВАЧІВ ФАЗ ОПТИЧНИМ МЕТОДОМ.....	200
ДОДАТОК В. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ВИЗНАЧЕННЯ КАПЛЯРНОЇ УТРИМУЮЧОЇ ЗДАТНОСТІ СІТЧАСТИХ РОЗДІЛЮВАЧІВ ФАЗ.....	219
ДОДАТОК Г. СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ПО ТЕМІ ДИСЕРТАЦІЇ І ВІДОМОСТІ ПРО АПРОБАЦІЮ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЇ.....	247

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

АТ	–	азотний тетроксид
ВМ	–	витратна магістраль
ДВП	–	двопозиційний вимірювальний прилад
ДКА	–	дослідницький космічний апарат
ЕВ	–	експериментальне випробування
ЕКД	–	еквівалентний капілярний діаметр
ЗЗС	–	засіб забезпечення суцільності
КЛА	–	космічний літальний апарат
КП	–	компонент палива
КРФ	–	капілярний розділювач фаз
КТ	–	космічний телескопі
КУЗ	–	капілярна утримуюча здатність
МБР	–	міжконтинентальна балістична ракета
НДМГ	–	несиметричний диметилгідразин
ПГС	–	пневмогідросистема
ПРФ	–	поверхня розділу фаз
РН	–	ракета-носій
РРБ	–	розгінний ракетний блок
РСУ	–	ракетна система управління
СОМ	–	система орбітального маневру
СРФ	–	сітчастий розділювач фаз
ТТХ	–	тактико технічні характеристики
ТУ	–	технічні умови

- РУ – рушійна установка
- ШСЗ – штучний супутник землі

ВСТУП

Актуальність теми. Прогрес у освоєнні космосу значною мірою йде шляхом створення та запуску нових багаторазових космічних систем, подовження термінів експлуатації функціонуючих супутників (зокрема, супутників на геостаціонарній орбіті), а також розширення існуючої, та створення нової космічної інфраструктури (на базі космічних станцій), її обслуговування та експлуатації. Збільшення масштабу космічної діяльності та її дедалі більша комерційна спрямованість висувають особливі вимоги до космічних літальних апаратів (КЛА), які визначають процес розвитку в цій галузі. Це – можливість багаторазового використання та тривалої експлуатації КЛА.

Політ космічних літальних апаратів з багаторазовим включенням рушійної установки (зазвичай мають тривалий термін експлуатації): космічних станцій, космічних буксирів (притаманна також розгінним блокам), телекомунікаційних супутників, космічних телескопів, дослідницьких зондів, тощо, характеризується чергуванням активних ділянок траєкторії, коли працює рушійна установка, та пасивних ділянок, на яких рідинні компоненти палива в баках знаходяться під впливом невагомості (мікрогравітації). В останньому випадку, внаслідок різноманітних збурюючих факторів (дії сонячного вітру, внутрішніх гравітаційних сил, прискорення від ракетних двигунів малої тяги системи орієнтації та стабілізації та ін.) можуть займати в них будь-яке положення. Для забезпечення нормального функціонування рушійної установки, зокрема і в умовах мікрогравітації, на вході до витратної магістралі встановлюють спеціальні засоби забезпечення суцільності палива. При цьому не виключена ситуація, коли газова фаза потрапить до засобу забезпечення суцільності палива, а звідти до витратної магістралі. Як наслідок, в подальшому це може призвести до неможливості повторного запуску рушійної установки і аварійному завершенню місії.

У такому випадку, умовою забезпечення суцільності компонентів палива на вході у рушійну установку стає запобігання потраплянню газової

фази в об'єм компонента палива, який розташовано в районі засобу забезпечення суцільності палива, та безпосередньо в ньому, у період запуску і подальшої роботи двигуна.

Однією із систем, що ефективно забезпечують подачу компоненту палива на вхід до рушійної установки без наявності в ньому газової фази, та можливість її багаторазового запуску в умовах невагомості (мікрогравітації), є капілярні засоби забезпечення суцільності палива.

Основним функціональним елементом таких систем є капілярний розділювач фаз, функціонування якого заснована на використанні сили поверхневого натягу рідини. Існування капілярного перепаду тиску при переході через поверхню розподілу фаз забезпечує утримання палива у визначеному місці баку.

Найчастіше роль основного, або допоміжного капілярного розділювача фаз у різних типах капілярних забірних пристроїв виконують металеві ткані сітки з чарунками мікронних розмірів, які у цьому випадку називають – сітчастими розділювачами фаз (СРФ).

Основним проектним параметром СРФ є капілярна утримуюча здатність (КУЗ). Вона відповідає за максимальний перепад статичного тиску, за якого не відбувається проникнення крізь чарунки сітки газової фази. При проектуванні КУЗ намагаються максимізувати, але таким чином, щоб гідравлічні втрати тиску при протіканні компоненту палива крізь СРФ, навпаки, були мінімальними.

У КЛА з тривалим терміном експлуатації під впливом дії агресивних палив, що перебувають в паливних баках, наприклад: азотного тетроксиду та несиметричного диметилгідразину, КУЗ СРФ може змінюватися. Причинами цього є зменшення діаметрів дротів сітки, утворення на поверхні дроту плівок, гелів, опадів внаслідок корозійних процесів. Це призводить до того, що при тривалому впливі агресивних палив та їх парів на конструкційні матеріали сіток відбувається зміна геометричних розмірів дроту та чарунок сітки, а також

можлива зміна величини контактного куту змочування палива з матеріалом сітки. В сукупності все це може сприяти критичному зниженню КУЗ.

Пори дрібночарункових сіток мають дуже складну форму, що не дозволяє визначити капілярну утримуючу здатність сітчастих розділювачів фаз розрахунковим шляхом. Перспективним напрямком у підвищенні досконалості, ефективності, та надійності експлуатації конструкцій капілярних засобів забезпечення суцільності палива є визначення впливу тривалого зберігання сітчастих розділювачів фаз у компонентах та під парами рідких ракетних палив: азотного тетроксиду та несиметричного диметилгідразину на зміну їх основного проектного параметру – капілярної утримуючої здатності шляхом її експериментального дослідження.

Таким чином, встановлення закономірностей зміни проектних параметрів СРФ в залежності від терміну дії на їх конструкційні матеріали компонентів рідких ракетних палив: азотного тетроксиду та несиметричного диметилгідразину і створення методики їх розрахунку та проектування, є актуальною та своєчасною науковою задачею.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. В основу дисертації покладено матеріали, які узагальнюють дослідження, проведені автором під час виконання науково-дослідних робіт відповідно до наступних тематичних планів:

1. «Концепція Загальнодержавної цільової науково-технічної космічної програми України на 2021-2025 роки» схвалено розпорядженням кабінету Міністрів України від 13 січня 2021 р. №15-р.

2. Дослідження параметрів сітчастих розділювачів фаз опісля їх тривалого перебування в робочих рідинах, згідно програми «Дніпро-ПСХ 35» – ДП «КБ «Південне».

3. Розробка перспективних систем запуску двигуна в умовах невагомості (мікрогравітації) космічних літальних апаратів, згідно програми «Науково-технічного розвитку підприємства» – ДП «КБ «Південне».

4. Модернізація ракет-носіїв і космічних літальних апаратів щодо

зниження несприятливого впливу на екологію навколосемного космічного простору (номер теми ФТФ-26-13, номер держреєстрації 0114U000185) – Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара.

5. Закономірності процесів гідродинаміки і теплообміну в умовах низької гравітації та їх вплив на проектні параметри систем подачі палива літальних апаратів (номер теми 6-242-11, номер держреєстрації 0111U001142) – Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є встановлення закономірностей зміни КУЗ СРФ протягом тривалого терміну їх експлуатації і удосконалення методик визначення параметрів капілярних засобів забезпечення суцільності палива з урахуванням тривалого терміну дії на них компонентів рідкого ракетного палива: азотного тетроксиду та несиметричного диметилгідразину.

Для досягнення поставленої у дисертаційній роботі мети сформульовано наступні завдання:

- визначити швидкість корозії основного конструкційного матеріалу СРФ – сталевих сіток саржевого типу переплетіння, та її вплив на структурні та геометричні характеристики сіток в залежності від терміну їх експлуатації;
- провести експериментальні випробування з визначення закономірностей у зміні КУЗ СРФ капілярних засобів забезпечення суцільності палива в залежності від терміну їх експлуатації;
- удосконалити математичні моделі визначення основних проектних параметрів капілярних засобів забезпечення суцільності палива враховуючи термін їх експлуатації;
- розробити методику визначення основних проектних параметрів капілярних засобів забезпечення суцільності палива, що враховує вплив на КУЗ СРФ терміну їх експлуатації.

Об'єкт дослідження – Утримуюча здатність сітчастого розподілювача фаз капілярного засобу забезпечення суцільності палива у процесі довготривалої експлуатації космічного літального апарата.

Предмет дослідження – Процес зміни КУЗ СРФ капілярних засобів забезпечення суцільності палива (сталеві сітки саржевого типу переплетіння), які тривалий термін перебували під впливом хімічно агресивних компонентів палива – азотного тетроксиду та несиметричного диметилгідрозина і їх парів.

Методи дослідження. У роботі використано комплексний метод, який включає аналіз і узагальнення результатів відомих теоретичних досліджень та фізичних експериментів, сучасні теоретичні й експериментальні методи аналізу хімічного складу речовин і мікроструктури матеріалу, для оцінки їх складу і стану, зокрема методи неруйнівного контролю: рентгено-флуоресцентний; рентгено-структурний; атомно-абсорбційний; потенціометричний; турбодиметричний; інфрачервона спектроскопія; хромато-мас-спектрометрія; металографічний та електронно-мікроскопічний методи аналізу. За допомогою бульбашкового методу проведені експериментальні дослідження капілярних процесів, що відбуваються на межі розділу фаз рідина-газ. Проведення фізичного експерименту здійснювалось з використанням методики планування експерименту та статистичної обробки результатів вимірювань і визначення їх похибок. Використання зазначених методів забезпечує достовірність отриманих результатів, досягнення мети і вирішення поставлених у дисертаційній роботі задач.

Наукова новизна отриманих результатів досліджень полягає в тому, що:

1. Уточнено залежність швидкості корозії основного конструкційного матеріалу сітчастого розділювача фаз (на прикладі сітки зі сталі марки 12X18H10T саржевого типу плетіння № 008 з квадратною чарункою у світлі) від терміну їх перебування в хімічно агресивних компонентах палива (азотному тетроксиді та несиметричному диметилгідрозині) і під їх парами.

2. Вперше виявлено, що корозія сталі 12X18H10T у газовій фазі азотного тетроксиду та несиметричного диметилгідрозину протікає ~ 1,5 рази швидше, ніж у рідкій. У середньому вона, майже у 2 рази перевищує

відоме теоретичне значення, яке дорівнює $1 \cdot 10^{-4}$ мм на рік. Складає $1,91 \cdot 10^{-4}$ для азотного тетроксиду та $2,13 \cdot 10^{-4}$ для несиметричного диметилгідразину, що еквівалентно збільшенню розміру чарунок (на 31 рік експлуатації) з номінального значення у 80 мкм до 91,8 мкм (для азотного тетроксиду) та 93,2 мкм (для несиметричного диметилгідразину).

3. Виявлено закономірності процесу втрати КУЗ внаслідок порушення рівноваги зовнішніх та внутрішніх сил на поверхні розподілу фаз «рідина-газ» капіляру в чарунці сітки, що залежать від терміну перебування конструкційного матеріалу сітки в агресивних компонентах палива, фази (рідка чи газова) і типу компоненту (азотний тетроксид чи несиметричний диметилгідразин). Отримано графіки лінійної регресії зміни значень капілярної утримуючої здатності сітчастих розділювачів фаз за часом. Максимальне зниження капілярної утримуючої здатності отримано для сталевих сіток № 008, які впродовж 31 року перебували під впливом парів азотного тетроксиду та несиметричного диметилгідразину: 11% (для азотного тетроксиду) і 23% (для несиметричного диметилгідразину).

4. Вперше отримано, що у разі тривалого терміну перебування конструкційного матеріалу сітки № 008 в газовій фазі несиметричного диметилгідразина (31 рік), внаслідок адгезійних процесів на поверхні металу з часом відбувається поступове збільшення контактного кута змочування θ з 0° до 25° .

5. Отримано нові (більш точні) коефіцієнти для напівемпіричної математичної моделі критичного числа Бонда, що суттєво підвищує точність визначення основних параметрів СРФ при проектуванні капілярних ЗЗС палива.

6. Подальшого вдосконалення отримали математичні моделі визначення проектних параметрів капілярних засобів забезпечення суцільності палива за рахунок введення до них змінної складової – функції часу.

Практичне значення отриманих результатів є таким:

1. Розраховано коефіцієнти максимальної швидкості корозії, застосування яких вдосконалює інженерні методики розрахунків основних

параметрів сітчастих розділювачів фаз капілярних засобів забезпечення суцільності палива під час їх проектування.

2. На основі визначених при науково-експериментальних дослідженнях закономірностей розроблені інженерні методики розрахунку основних проектних параметрів сітчастих розділювачів фаз капілярних засобів забезпечення суцільності палива з тривалим терміном експлуатації, а саме:

- статичної капілярної утримуючої здатності;
- динамічної капілярної утримуючої здатності;
- гідравлічного опору.

3. Використовуючи удосконалений підхід до визначення основних проектних параметрів СРФ капілярних засобів забезпечення суцільності палива з тривалим терміном експлуатації у хімічно агресивних компонентах палива (азотному тетроксиді та несиметричному диметилгідрозині) і під їх парами, можливо оперативно та з більшою точністю, ніж це було раніше, визначити: статичну і динамічну капілярну утримуючу здатність, еквівалентний капілярний діаметр пор, коефіцієнт гідравлічного опору і мінімально потрібну площу змоченої поверхні сітчастого розділювача фаз, застосовувати оптимальні значення коефіцієнтів запасу і підібрати оптимальний типорозмір сітки ще на етапі ескізного проектування, що дозволить оптимізувати обрану конструкцію і зробити її більш надійною.

4. Використання удосконалених методик вибору основних проектних параметрів СРФ капілярних засобів забезпечення суцільності палива з тривалим терміном експлуатації у хімічно агресивних компонентах палива (азотному тетроксиді та несиметричному диметилгідрозині) і під їх парами, дозволяє зменшити кількість експериментальних випробувань (або відмовитись від них взагалі) і, тим самим, зменшити загальні часові та матеріально-технічні витрати при виконанні проектних робіт.

5. Результати теоретичних та експериментальних досліджень, розрахункові моделі, а також розроблені методики визначення основних проектних параметрів СРФ капілярних засобів забезпечення суцільності

палива з тривалим терміном експлуатації у хімічно агресивних компонентах палива (азотному тетроксиді та несиметричному диметилгідразині) і під їх парами знайшли практичне використання (підтверджено актами впровадження та апробування) у виробничому процесі ДП «КБ «Південне» ім. М.К. Янгеля під час виконання робіт з розробки перспективних космічних літальних апаратів та їх окремих систем.

б. Результати дисертаційних досліджень використовуються у процесі проведення лекційних, практичних і лабораторних занять відповідно до навчальних планів на кафедрі ракетно-космічних та інноваційних технологій Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара.

Особистий внесок здобувача.

За результатами виконаних досліджень опубліковано 21 наукова робота, з них 1 стаття [10] у вітчизняному фаховому виданні, що входить до наукометричної бази *SCOPUS* та *Web of Science*, 2 статті [208, 210] у закордонному виданні, що входить до наукометричної бази *Web of Science* та 6 статей [195, 196, 197, 206, 209, 223] у фахових виданнях України, що входять до наукометричних баз даних *Index Copernicus*, *Google Scholar*, *CiteFactor*. Без співавторства виконано 4 статті [10, 195, 206, 209]. В матеріалах наукових конференцій та збірниках тез доповідей опубліковано 12 праць [168, 169, 192, 193, 194, 205, 211, 212, 213, 220, 221, 222].

У роботах, опублікованих у співавторстві, здобувачеві належать:

[196, 210] – побудова 3D моделей, обробка і аналіз результатів, визначення залежностей; [197] – експериментальне дослідження, обробка і аналіз результатів; [208] – теоретичне й експериментальне дослідження, обробка і аналіз результатів, визначення залежностей; [223] – проведення розрахунків, аналіз результатів, висновки; [169, 192] – літературний огляд та визначення основних залежностей; [193, 194, 221] – літературний огляд, розробка математичної моделі, аналіз результатів, висновки; [220] – розробка 3D моделі, обробка й аналіз, висновки; [222] – літературний огляд, визначення залежностей, висновки.

Всі етапи досліджень, аналізу й узагальнення теоретичних і експериментальних результатів, а також формулювання висновків та рекомендацій, які винесено на захист, отримані здобувачем особисто. Текст дисертації написано автором особисто.

Апробація матеріалів дисертації.

Основні положення й результати дисертаційної роботи доповідалися й обговорювалися на: науково-практичній конференції «Сучасні розрахунково-експериментальні методи визначення характеристик ракетно-космічної техніки» (Дніпро, 2019 р.); II Міжнародній науково-технічній конференції «Динаміка, міцність та моделювання в машинобудуванні» (Харків, 2020 р.); 71-st International Astronautical Congress (London, 2020 р.); 72-st International Astronautical Congress (Dubai, 2021 р.); XVI наукових читань «Дніпровська орбіта» (Дніпро, 2021 р.); XVI наукових читань «Дніпровська орбіта» (Дніпро, 2021 р.); XXIV Міжнародній молодіжна науково практичній конференції «Людина і космос» (Дніпро, 2022 р.); X Всесвітньому конгресі «Безпека в авіації та космічні технології» (Київ, 2022 р.); VIII Міжнародній науково-практичній конференції «Комп'ютерна гідромеханіка» (Київ, 2022 р.); XXV Міжнародній молодіжна науково практичній конференції «Людина і космос» (Дніпро, 2023 р.); 74-st International Astronautical Congress (Baku, 2023 р.); Третій науково-практичній інтернет конференції «Космічні горизонти» (Дніпро, 2024 р).

Структура та обсяг дисертації.

Дисертаційна робота складається з вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, списку використаних джерел з 225 найменувань і 4-ох додатків. Загальний обсяг роботи становить 252 сторінок, у тому числі 103 рисунка та 39 таблиць.

РОЗДІЛ 1

КАПІЛЯРНІ ЗАСОБИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СУЦІЛЬНОСТІ ПАЛИВА. МЕТА, ЗАВДАННЯ Й МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Основною тенденцією при створенні нових космічних літальних апаратів (КЛА), систем багаторазового використання і космічної інфраструктури в цілому є значний термін їх експлуатації (десятки років). Крім цього розглядається можливість подовження термінів експлуатації функціонуючих КЛА (наприклад, штучних супутників Землі телекомунікаційного зв'язку), а також існуючої космічної станції за рахунок їх обслуговування [1 – 10].

При цьому на більшості КЛА, використовуються, й вочевидь, будуть використовуватися в найближчі десятиріччя рушійні установки (РУ) на рідкому паливі. У зв'язку з цим, збільшення запасів палива на орбіті, збільшення строків експлуатації та багаторазове використання КЛА призводять до подальшого зростання вимог, що висувають до систем зберігання та живлення рідинними ракетними компонентами палива (КП) РУ КЛА. Ці вимоги зводяться до наступного [1, 10, 11]:

- забезпечення мінімальної маси залишків КП (що не випрацьовуються);
- максимальне використання внутрішнього об'єму паливних баків та зручність їх розташування в КЛА;
- забезпечення працездатності систем зберігання та живлення рідинними КП РУ КЛА в агресивних середовищах;
- забезпечення тривалого терміну експлуатації з можливістю дозаправлення в процесі польоту (може передбачатися певна кількість циклів «заповнення-спорожнення»);
- можливість багаторазового використання систем зберігання та живлення рідинними ракетними КП РУ КЛА за мінімального об'єму відновлювальних робіт;
- економічність та технологічність виготовлення.

Разом із цим потрібно враховувати, що для польоту КЛА характерним є чергуванням активних ділянок траєкторії, коли працює РУ, та пасивних ділянок, на яких рідинні КП в баках знаходяться під впливом невагомості (мікрогравітації). Внаслідок різноманітних збурюючих факторів (дії сонячного вітру, внутрішніх гравітаційних сил, прискорення від двигунів системи орієнтації та стабілізації та ін.) в останньому випадку КП можуть займати в баках будь-яке положення. При цьому не виключена ситуація, коли газова фаза може потрапити до витратної магістралі (ВМ), що в подальшому може призвести до зриву повторного запуску РУ й аварійному завершенню місії [1, 10 – 18].

Тому, майже обов'язковим елементом систем зберігання та живлення рідинними ракетними КП РУ КЛА є засоби забезпечення суцільності (ЗЗС) палива, головним критерієм досконалості яких є величина залишків КП, які неможливо випрацювати без порушення суцільності рідини на вході до РУ [1, 10, 11, 12]. Безпосередньо конструкція ЗЗС палива визначається внутрішньою геометрією бака та характеристиками пневмогідросистеми (ПГС) КЛА.

Конструкції ЗЗС палива істотно ускладнюються за наявності декількох факторів, що виникають при виконанні КЛА польотного завдання: багаторазовий запуск та зупинення РУ КЛА, виконання складних маневрів в умовах різноспрямованих зовнішніх силових імпульсів. Це зокрема є притаманним для КЛА багатоцільового призначення [1, 10, 11, 12].

Невизначеність положення та неоднозв'язаність меж, між газом наддуву та КП на момент запуску РУ, потребують додаткових заходів для запобігання передчасному прориву газу у ВМ з його подальшим потраплянням до РУ [1, 10, 11, 12].

Серед багатьох способів досягнення зазначених цілей можливо виділити:

- використання ЗЗС палива на основі гнучких діафрагм, еластичних мішків, поршнів [1, 10, 12, 18 – 21];
- керування положенням КП за допомогою штучно створюваних масових сил [1, 10, 12, 13, 18, 19];
- керування положенням КП за допомогою електростатичних сил [1, 10, 18, 19, 22, 23];

- керування положенням КП за допомогою капілярних засобів розділу фаз [1, 10, 18, 19, 24,25, 26];
- використання відцентрових сепараторів [1, 10, 17, 18, 19, 27];
- використання засобів, що стабілізують положення центру мас КП [1, 10, 18, 19, 28].

1.1. Призначення та основні типи конструкцій капілярних засобів забезпечення суцільності палива

За більш ніж п'ять десятиріч були розроблені ЗЗС палива, дія яких заснована на різноманітних принципах [10, 20].

Водночас найбільшого розповсюдження отримали ЗЗС палива капілярного типу [1, 10, 25, 26, 29 – 32]. За цей час було вивчено основні фізичні принципи поведінки рідини під дією капілярних сил в умовах невагомості (мікрогравітації) і визначено основні типи конструкцій ЗЗС палива та описано спектр задач, що вони вирішують [10, 33 – 40].

Робота капілярних ЗЗС палива заснована на використанні сили поверхневої взаємодії, тобто на існуванні капілярного перепаду тиску при переході через поверхню розподілу фаз, що використовується для утримання КП у визначеному місці баку. Таким чином, бак і капілярний ЗЗС палива проектується так, щоб в умовах космічного польоту сили поверхневої взаємодії були співмірні, чи перевищували суму інших сил прикладених до рідини [1, 10].

Капілярні ЗЗС палива мають низку переваг над рештою систем орієнтації рідини в умовах невагомості (мікрогравітації). По-перше, капілярні ЗЗС палива мають простоту конструкції (відсутні рухомі частини) і високу довговічність. По-друге, в процесі функціонування вони не вимагають зовнішніх джерел енергії і слабо реагують на зміну інтенсивності поля масових сил. По-третє, вони допускають швидку перевірку своєї працездатності. Ефективний капілярний ЗЗС палива можливо розробити для будь-якої кількості запусків РУ, будь-яких КП, та будь-якого терміну експлуатації КЛА, враховуючи необхідність великої кількості циклів «заповнення-спорожнення» баків, та багаторазове використання системи

зберігання та живлення рідинними ракетними КП РУ КЛА [1, 10]. При цьому під час їх застосування потрібна кількість КП завжди залишається вільною від газових включень, що дозволяє здійснювати запуск РУ у будь-який необхідний час.

Таким чином, головною метою розробки капілярного ЗЗС палива є створення внутрішньобакових конструкцій, що забезпечують покриття достатньою кількістю рідини ЗЗС палива в момент запуску РУ для гарантованої подачі КП до неї, без наявності газових включень. Капілярні ЗЗС палива, окрім своєї основної функції можуть застосовуватися також для [1, 10]:

- зменшення плескання КП в баках;
- створення конструкції, здатної локалізувати місце розташування центру мас КП;
- видалення КП від дренажного отвору при заправці баків за умов невагомості.

Капілярні ЗЗС палива можна класифікувати за загальною ієрархією наведеною на Рис. 1.1 [1, 10].

Виходячи із функціональних вимог, яким повинні задовольняти капілярні ЗЗС палива, їх можливо розподілити на три основні типи: локальні, тотальні та засоби стабілізуючі положення центру мас рідини [1, 10].

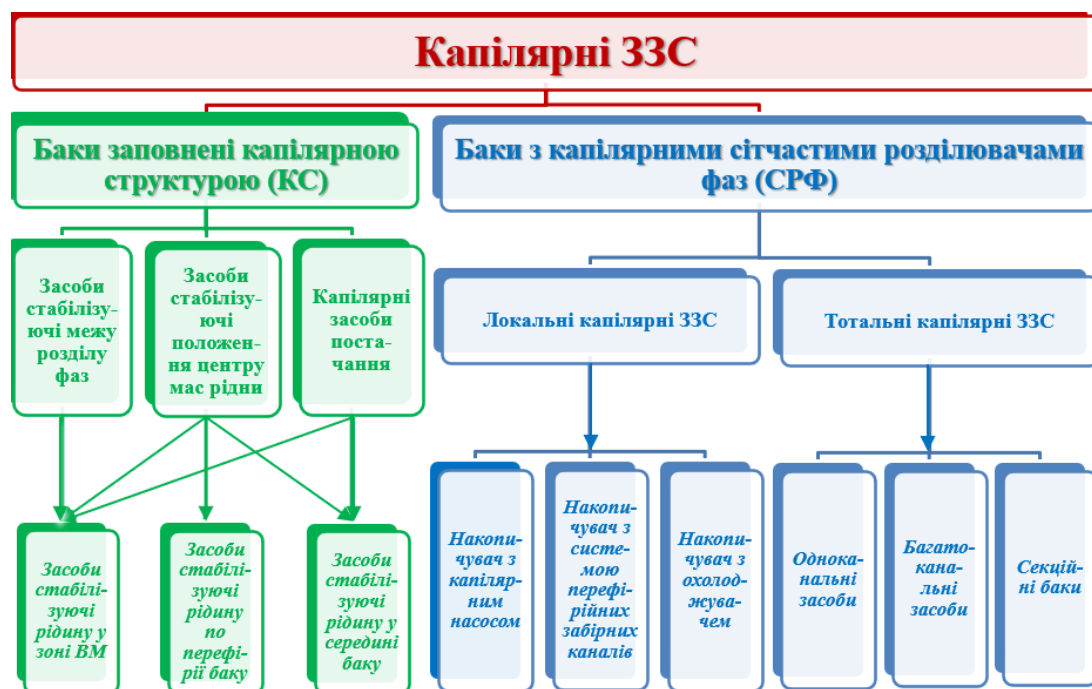


Рис. 1.1. Загальна ієрархія капілярних ЗЗС палива [1, 10]

Мінімальні вимоги висуваються до локальних капілярних ЗЗС палива (Рис. 1.2а), які зазвичай забезпечують постачання рідкого палива без порушення суцільності з паливних баків до входу у ВМ і далі до маршової рідинної ракетної РУ КЛА. По-перше, вони повинні забезпечити багаторазовий запуск РУ в умовах невагомості (мікрогравітації), або незначних знакозмінних прискорень. По-друге, її роботу протягом деякого проміжку часу, якого буде достатньо для перетікання основної маси рідини, що знаходиться у баку, до входу у ВМ. Таким чином, локальні капілярні ЗЗС палива можливо визначити, як конструкції, що здатні відібрати рідину без газових включень тільки з частини об'єму бака, його певної локалізованої зони, або відсіку, який має назву накопичувач («пастка», або «стартовий кошик»).

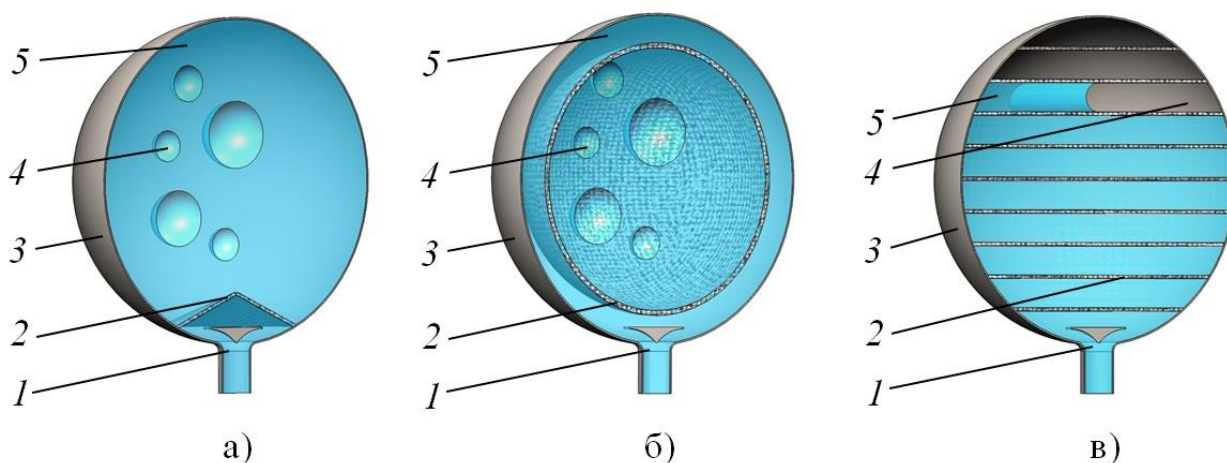


Рис. 1.2. Схематичне зображення капілярних ЗЗС палива за об'ємом функціональних вимог – локального типу (а), тотального (б) та засоби стабілізуючі положення центру мас рідини (в) : 1 – вхід у ВМ; 2 – капілярний розділювач фаз (КРФ); 3 – стінка баку; 4 – газова фаза; 5 – рідкий КП [10]

Локальні капілярні ЗЗС палива, за умовою роботи є системами часткового утримання КП. Вони поділяються на два класи: ті що не поповнюються, та ті що поповнюються.

Пристрої, що не поповнюються, призначені для випадку, коли прискорення, прикладене до КЛА, не осаджує КП на капілярний ЗЗС. Його обсяг розраховано на утримання в районі капілярного ЗЗС достатньої кількості КП, необхідного для виконання всієї програми включень РУ та маневрів КЛА.

Капілярний ЗЗС палива, що поповнюється, має обсяг, що забезпечує необхідну кількість КП для маневрів, що не викликають його осадження в проміжках між запусками РУ. З цією системою часто застосовують додаткові рідинні ракетні РУ малої тяги для створення передпускового прискорення та повторного заповнення капілярного ЗЗС палива. Характерною конструкцією капілярного ЗЗС палива, що поповнюється є РРБ РН «Циклон-4».

Капілярні ЗЗС палива локального типу (Рис. 1.2а) було застосовано на: КЛА «Apollo», РРБ «Agena», СОМ КЛА «SpaceShuttle», 4-му ступеню міжконтинентальної балістичної ракети (МБР) «Peacekeeper» (Рис. 1.3а), РРБ «Centaur», РРБ РН «Циклон-4», штучних супутників землі (ШСЗ) телекомунікаційного зв'язку «Eurostar» (Рис. 1.3.б), «Star 2» (Рис. 1.3в) «SS/Loral», «Arabsat», «INSAT-1D» [1, 10, 19, 31, 33 – 34, 41 – 49].

Тотальні капілярні ЗЗС палива (Рис. 1.2б) використовуються для постачання палива у рідинні ракетні РУ ракетних систем управління (РСУ), які повинні вирішувати більш широке коло завдань. В цих РУ капілярні ЗЗС забезпечують безперервний потік палива не лише для включення двигунів, яке, зазвичай, виконується при невагомості (мікрогравітації), але й протягом всього періоду їх функціонування, коли положення рідини у баку змінюється і його важко передбачити. Для таких рідинних ракетних РУ РСУ і були розроблені тотальні капілярні ЗЗС палива, які здатні виконувати відбір рідини, що знаходиться в будь-якій зоні баку.

Тотальні капілярні ЗЗС палива, за умовою роботи є системами повного зв'язку КП.

Капілярні ЗЗС палива тотального типу було застосовано на: РСУ КЛА «SpaceShuttle», КЛА «SpaceTag», РСУ КЛА «Буран», ШСЗ

телекомунікаційного зв'язку «Star 1» (Рис. 1.3г), «Iridium» (Рис. 1.3д), «GOES», «INSAT», тимчасової РСУ космічної станції «Space Station Interim Control Module» (Рис. 1.3е), космічному телескопі (КТ) «AXAF» [1, 10, 19, 33 – 35, 49 – 53].

Локальні та тотальні капілярні ЗЗС палива мають, як свої переваги, так і недоліки, що обмежують поле їх застосування. Тому на практиці, на цей час, більшість капілярних ЗЗС палива, що розроблені і експлуатуються у складі КЛА мають ознаки, як локальних, так і тотальних ЗЗС палива. Тому, на додаток до запропонованої класифікації, їх можливо виділити в окрему групу – комбінованих капілярних ЗЗС палива.

Використання комбінованих капілярних ЗЗС палива у складі систем живлення КП КЛА зумовлено, перш за все, необхідністю безперервного постачання палива до РУ, як на активних, так і на пасивних ділянках траєкторій польоту КЛА. За конструкцією схема таких засобів припускає постачання КП до двигунів РСУ та маршової РУ з одного спільного баку. Тому комбіновані капілярні ЗЗС палива мають, як накопичувач, що поповнюється після кожного запуску маршової РУ, так і систему зв'язку накопичувача з основною масою палива, для постійного підживлення двигунів РСУ.

За конструкцією та режимами роботи, до комбінованих капілярних ЗЗС палива можливо віднести: РРБ РН «Циклон-4» (Рис. 1.3ж), систему орбітального маневру (СОМ) КЛА «SpaceShuttle» (Рис. 1.3з) та ШСЗ телекомунікаційного зв'язку «SS/Loral» (Рис. 1.3и).

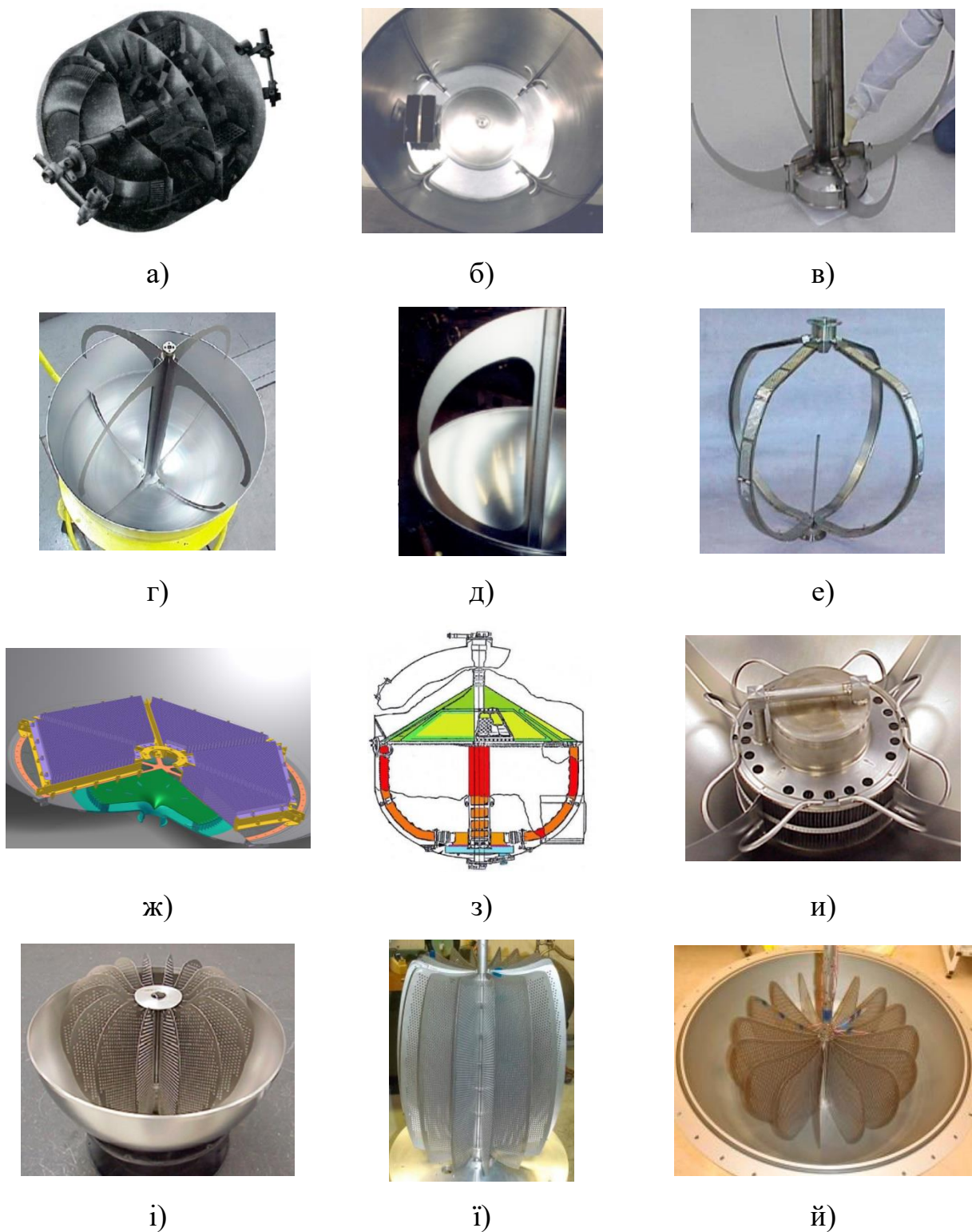


Рис. 1.3. Приклад різних типів капілярних ЗЗС палива за об'ємом функціональних вимог втілених в конструкціях існуючих КЛА: а) МБР «Peacekeeper»; б) ШСЗ «Eurostar»; в) ШСЗ «Star 2»; г) ШСЗ «Star 1»; д) ШСЗ «Iridium»; е) РСУ «Space Station Interim Control Module»; ж) РРБ РН «Циклон-4»; з) СОМ КЛА «SpaceShuttle»; и) ШСЗ «SS/Loral»; і) ДКА «Orbital Express»; ї, й) КТ «JWST» (дві модифікації) [1, 10, 33 – 35, 54]

ЗЗС палива стабілізуючі положення центру мас рідини (Рис. 1.2в) повинні відповідати самим жорстким вимогам, оскільки вони використовуються для постачання палива у рідинні ракетні РУ міжпланетних і орбітальних КЛА, в яких ракетне паливо складає значну частину від всієї маси апарату. Крім безперервного постачання КП до споживача ці пристрої повинні забезпечувати мінімальну зміну положення центру мас рідини під час роботи двигунів РСУ, постійний контакт газової «подушки» з отвором для подачі газу та незначні сплески рідини під час запуску маршової РУ. ЗЗС палива стабілізуючі положення центру мас рідини являють собою внутрішньобакову конструкцію, яка впливаючи на поверхню розділу фаз «рідина-газ» здатна керувати взаємним положення рідини і газу всередині бака.

ЗЗС палива, що стабілізують положення центру мас рідини, за умовою роботи є системами повного утримання КП. Пристрій ділить перегородками з вікнами, закритими сіткою, внутрішній об'єм бака на частини, в яких знаходиться майже вся рідина при повністю заповненому баку.

Капілярні ЗЗС палива, що стабілізують положення центру мас рідини було застосовано на: КЛА «Viking Orbiter», КЛА «Jupiter Orbiter», дослідницькому космічному апарату (ДКА) «Orbital Express» (Рис. 1.3і), КТ «SDO» та «JWST» (Рис. 1.3ї, й) [1, 10, 19, 33 – 35, 49].

Капілярні ЗЗС палива складаються із зварних конструкцій, встановлених у паливні баки. Ці конструкції зібрані з комбінації деталей, виконаних за допомогою механічної обробки, та різних варіацій капілярних розділювачів фаз (КРФ): листового фасонного матеріалу (жолобів, стільників, пелюсток, системи конусів, віял, та ін.), а також пористих елементів – перфорованих листів металу, пористих металів, сітчастих екранів, комбінованих пористо сітчастих металів [1, 10, 25, 26, 29, 35, 55].

Конструктивне виконання капілярних ЗЗС палива відомих систем можливо розділити на п'ять найпоширеніших видів: лопатки (vanes);

капілярні насоси (galleries); колектори (sponge); накопичувачі («пастки», «стартові кошики», trap); жолоби (trough) (Рис. 1.4.) [10].

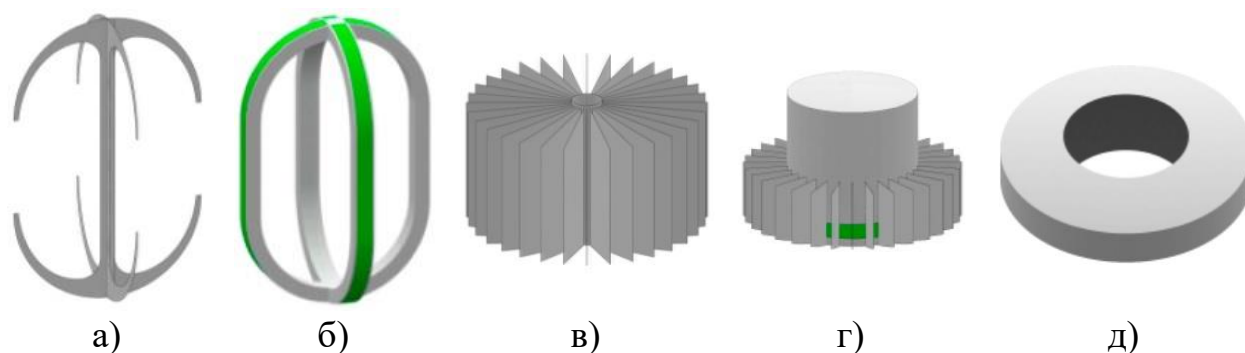


Рис. 1.4. Види конструктивного виконання капілярних ЗЗС палива: а) лопатки (vanes); б) капілярні насоси (galleries); в) колектори (sponge); г) накопичувачі («пастки», «стартові кошики», trap); д) жолоби (trough) [10, 33 – 35]

Лопатки. Їх можна віднести до одного з видів капілярних насосів, які застосовуються при відносно невеликих прискореннях ($10^{-7} \dots 10^{-3}$) $\cdot g$. Лопатки переміщують рідину в район ВМ з невеликою швидкістю течії. Рідина концентрується у вершинах двограних кутів, утворених поверхнями лопаток та внутрішньою поверхнею стінки бака. Форма лопатки повинна забезпечувати рух рідини у напрямку ВМ. Площа поверхні лопатки зростає у напрямку ВМ, збільшуючи радіус кривизни поверхні рідини, сконцентрованої у вершині двогранного кута. Двогранні кути, утворені поверхнями лопаток, у місцях їх перетину над ВМ, вздовж осьової лінії бака забезпечують локалізацію рідини, необхідної для включення двигуна.

Невеликі бічні прискорення призводять до того, що рідина йде з двограних кутів на одній стороні стінки бака і збирається з іншого боку. Процес відбувається доти, поки гідростатичний тиск, викликаний прискоренням, не врівноважується капілярними силами. Коли прискорення знизиться, маса рідини, зібрана на стінці бака, повинна перебувати в контакті хоча б з однією лопаткою, яка буде переміщати рідину назад у район ВМ. З

цієї умови вибирається мінімальна кількість лопаток, необхідна для надійного функціонування РУ

Капілярні насоси. Вони так само, як і лопатки, використовуються для переміщення КП всередині бака. На відміну від лопаток, їх застосовують в космічних ступенях РН, що зазнають сильніших навантажень ($10^{-6} \dots 10^{-1}$) g.

Капілярні насоси є профілями круглого або прямокутного перерізу, які розташовані по меридіанам вздовж осі бака. На поверхні, зверненої до стінки бака, у капілярних насосах прорізані вікна закриті сіткою. Газ, що потрапив у насос, не видаляється через сітчастий екран, тому він заповнюється рідиною під час заправки та залишається заповненими до повного випорожнення бака. Кількість капілярних насосів та їх розташування має забезпечувати постійний контакт КП, щонайменше з одним із вікон.

Колектори. Вони призначені для статичного утримання рідини за умови помірних ($10^{-3} \dots 10^{-2}$) g навантажень. Колектори є групою складових радіальних листових елементів, або одного елемента, вигнутого у вигляді гофрованого віяла. Колектори можуть бути виконані з суцільного листового металу, а також з сіток. Канали, що звужуються, утворені елементами колектору, забезпечують надходження рідини до центру колектору без газових включень.

Колектори часто використовуються в поєднанні з лопатками, насосами та накопичувачами, як додаткові пристрої. Колектори необхідні у випадках, коли програма польоту викликає періодичну ізоляцію маси КП від капілярних насосів. У цьому випадку кількість КП, яка утримується колектором, повинна забезпечувати РУ паливом до його поповнення.

Окремим випадком колекторів є стільниковий накопичувач, що є конструкцією, яка складається зі з'єднаних між собою методом зварювання профільованих пластин, що утворюють замкнені осередки, відкриті з торців. Стільниковий накопичувач встановлюється над сітчастим екраном та

забезпечує відбір КП з бака на пасивних ділянках польоту для живлення двигунів РСУ. На ділянках роботи маршової РУ стільниковий накопичувач повторно заповнюється паливом.

Накопичувачі. Їх застосовують для статичного утримання рідини при відносно великих (до $1 g$) прискореннях.

Накопичувач системи часткового утримання КП є контейнером, у суцільних стінках якого прорізані кілька вікон, закритих сітками. Вікна необхідні для наповнення та спорожнення накопичувача. Осередки сітки досить малі для утримання рідини при максимально очікуваних прискореннях під час польоту. Площа вікна розраховується за умов мінімуму суми динамічного та гідростатичного напорів для випадку максимальних величин витрат КП та польотних навантажень.

Накопичувачі можуть використовуватися і в системах повного зв'язку КП. Накопичувач статично утримує КП при повному, або частковому його заповненні та накопичує газ, коли спорожнюється.

Системи повного утримання КП з накопичувачем застосовуються лише тоді, коли програма управління ступенем РН включає маневри, що викликають бічні та позитивні осьові навантаження, у яких КП осідає у бік ВМ. Вони не застосовуються, коли вектор прискорень спричиняє локалізацію КП у районі верхнього днища бака. В останньому випадку значення залишку КП, що не забирається значно збільшується. При дії бокового навантаження газова порожнина, що має сплюснуту форму, рухається в напрямку, протилежному напрямку вектору прискорення, усередині верхнього відділення, заповненого рідиною. Ця порожнина зростає в діаметрі в міру спорожнення бака, а при досягненні нею свого найбільшого розміру площа течії рідини зменшується, динамічний напір перевищує капілярну утримуючу силу, і газ проникає в наступний відсік. Процес повторюється у кожному відсіку, доки останній не спорожниться.

Приватним випадком накопичувачів є сітчастий екран, що встановлюється над ВМ та утримує КП в районі забірнього отвору на пасивних ділянках траєкторії польоту.

Жолоби. Являють собою конструкції, які за своїми функціями подібні до накопичувачів і колекторів. Вони утримують рідину за умов великих перевантажень, як накопичувачі і можуть поповнюватися, як колектори. Поповнення жолобів відбувається за допомогою капілярних насосів та лопаток. Жолоби зазвичай застосовуються в умовах впливу великих бічних перевантажень, перпендикулярних до осі бака.

За конструкцією жолоб є круглим або прямокутним профілем, розташованим співвісно з центральною віссю бака. Жолоб може бути відкритий збоку та обов'язково відкритий знизу. Він випорожнюється під дією передпускового навантаження через донні отвори, закриті сіткою. Жолоби можуть використовуватися у поєднанні з пастками, лопатками, капілярними насосами та колекторами.

На практиці, при проектуванні капілярного ЗЗС палива, для виконання складних програм сучасних космічних місій активно застосовуються різноманітні варіанти комбінацій основних типів ЗЗС за об'ємом функціональних вимог, та видів їх конструктивного виконання.

Прикладом такого підходу може бути капілярний ЗЗС палива, що розробляється космічними інженерами Євросоюзу для РРБ РН «Ariane 5» (A5ME) (Рис. 1.5.), який оснащений новою рідинною ракетною РУ VINCI, що має можливість багаторазового включення в умовах невагомості (мікрогравітації) [10, 56 – 58].

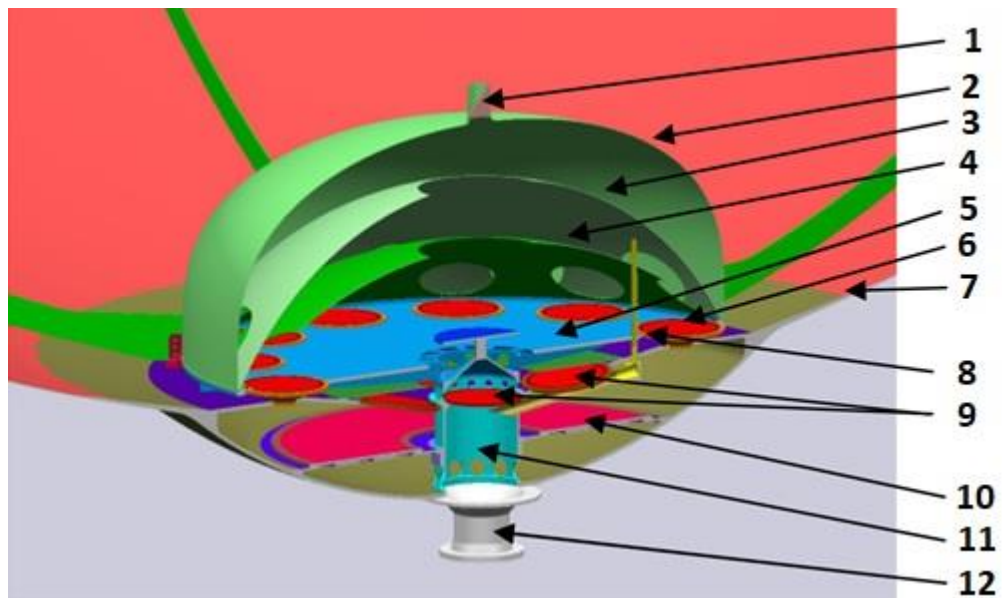


Рис. 1.5. Конструктивна схема капілярного ЗЗС палива бака окислювача РРБ А5МЕ: 1 – дренажний отвір; 2 – зовнішня стінка накопичувача; 3 – 1-й внутрішній конус накопичувача; 4 – 2-й внутрішній конус накопичувача; 5 – розмежувальна пластина; 6 – «вікно» перекрите сітчастим екраном; 7 – стінка баку; 8 – внутрішня перегородка; 9 – центральні отвори перекриті сітчастим екраном; 10 – сітчастий екран спрямування потоку рідини на вході у ВМ; 11 – сепаратор на вході у ВМ; 12 – вихід у ВМ [10, 56 – 57]

Капілярний ЗЗС палива бака окислювача (LO_x) РРБ А5МЕ являє собою накопичувач, що поповнюється. Дві внутрішні конічні перегородки розділяють верхню порожнину накопичувача на три відсіки. В середині відсіків рідина може вільно перетікати крізь отвори в основі конусів. Внутрішні конуси встановлені на багатошарову пластину (перегородку), яка відділяє верхній відділ накопичувача від меншого нижнього. Рідина може перетікати від верхнього до нижнього відділу крізь «вікна», які перекриті гофрованими сітчастими екранами. Гофрування збільшує загальну площу сітки, та зменшує втрати тиску на ній. Сепаратор на вході у ВМ оснащений дренажним трубопроводом, який на пасивних ділянках траєкторії дренажує газ, що підіймається від РУ у бак.

Декілька перегородок (лопаток) розташовано за межами накопичувача. Вони керують рідиною під час балістичної фази траєкторії та підтримують процес поповнення накопичувача. Також вони служать для рівномірності розподілу рідини на вході у накопичувач.

Така конструкція капілярного ЗЗС палива також здатна утримувати рідину у накопичувачі при обертанні РРБ навколо осі.

Наведений вище огляд свідчить про значне різноманіття конкретних конструкцій капілярних ЗЗС палива, що використовуються на сьогодні у системах живлення рідинних ракетних РУ КЛА.

Незважаючи на це, частіше за все, капілярні ЗЗС палива являють собою розділюючи перегородки з «вікнами», капілярні насоси, накопичувачі, або жолоби перекриті тканими металевими сітками, які є одним з найпоширеніших і найкращих матеріалів для застосування у якості КРФ [1, 10, 59]. КРФ, основним робочим елементом яких є металеві ткані сітки з чарунками мікронних розмірів, називають сітчастим розділювачем фаз (СРФ).

Застосування сіток у якості основного робочого елемента КРФ має ряд переваг над іншими матеріалами, таких як: ефективна робота у широкому діапазоні динамічних навантажень, висока капілярна утримуюча здатність (КУЗ) при порівняно невеликій масі конструкції, довговічність, мінімальний час підготовки двигуна до включення, універсальність та надійність. До недоліків слід віднести складність конструкції, відносно велику вартість, необхідність проведення довготривалого експериментального випробування.

Металеві ткані сітки, що використовуються у СРФ, виготовлюються в досить широкому діапазоні типів плетінь (структур) дротяної тканини, що наведено у Рис. 1.6 [10].

Найбільш широко розповсюджені сітки з квадратними і нульовими чарунками (так звані «фільтрові сітки»). Особливістю перших з них є те, що дроти основи та утоки мають рівні діаметри і розташовані на однаковій відстані друг від друга. «Фільтрові сітки» характеризуються тим, що дроти одного з напрямлень (утоки) прилягають один до одного настільки щільно,

що між ними практично відсутні просвіти. За структурою сітки з квадратними чарунками розподіляються на два типи плетіння: полотняне та саржеве (**Plain Square** та **Twill Square**, відповідно) [1, 10 60 – 63]. «Фільтрові сітки» розподіляються на три типи плетіння: полотняне голландське, саржеве та зворотне саржеве голландське (**Plain Dutch**, **Dutch Twill** та **Reverse Plain Dutch**, відповідно) [1, 10, 64, 65].

Полотняне плетіння (Рис. 1.6а) є найпоширенішим і найпростішим для плетіння. Це стандартний тип плетіння для дротяної тканини, в результаті якого утворюються квадратні отвори з однаковими розмірами дроту в обох напрямках. Кожен дріт основи проходить по черзі поверх і під дротами утоки під прямим кутом в обох напрямках [1, 10].

Саржеве плетіння дротяної тканини (Рис. 1.6б) – це коли утоковий дріт проходить вище та нижче двох дротів основи, утворюючи квадратні отвори та діагонально сплетені візерунки, які виглядають як саржа [1, 10].

Саржеве плетіння може бути виготовлене з металевого дроту більшого діаметру, ніж полотняне, що може зробити сітку більш стабільною та отримати більшу міцність, щільність і стійкість до корозії [1, 10].

Полотняне голландське плетіння дротяної тканини (Рис. 1.6в) – це метод щільного плетіння. Діаметр дроту утоку менший за діаметр дроту основи, що дозволяє основі бути ближче одна до одної, таким чином утворюючи дуже щільний, рівний, верхній і нижній малюнок [1, 10].

Полотняне голландське плетіння не має прямих прозорих отворів, як звичайне полотняне. Навпаки, цей метод плетіння створює звивистий шлях, завдяки якому можна досягти більш високих значень КУЗ. У той же час, він забезпечує в рази вищу механічну міцність, ніж інші поширені способи плетіння [1, 10].

Саржеве голландське плетіння дротяної тканини (Рис. 1.6г) – це стиль плетіння, подібний до полотняного голландського. Виготовляється за допомогою саржевого плетіння, коли утоковий дріт меншого діаметру все ще використовується, і кожен утоковий дріт проходить через два дроти основи,

роблячи сітку пропорційною до тонкості. Порівняно з полотняним голландським, плетіння щільніше, а ефект фільтрації точніший [1, 10].

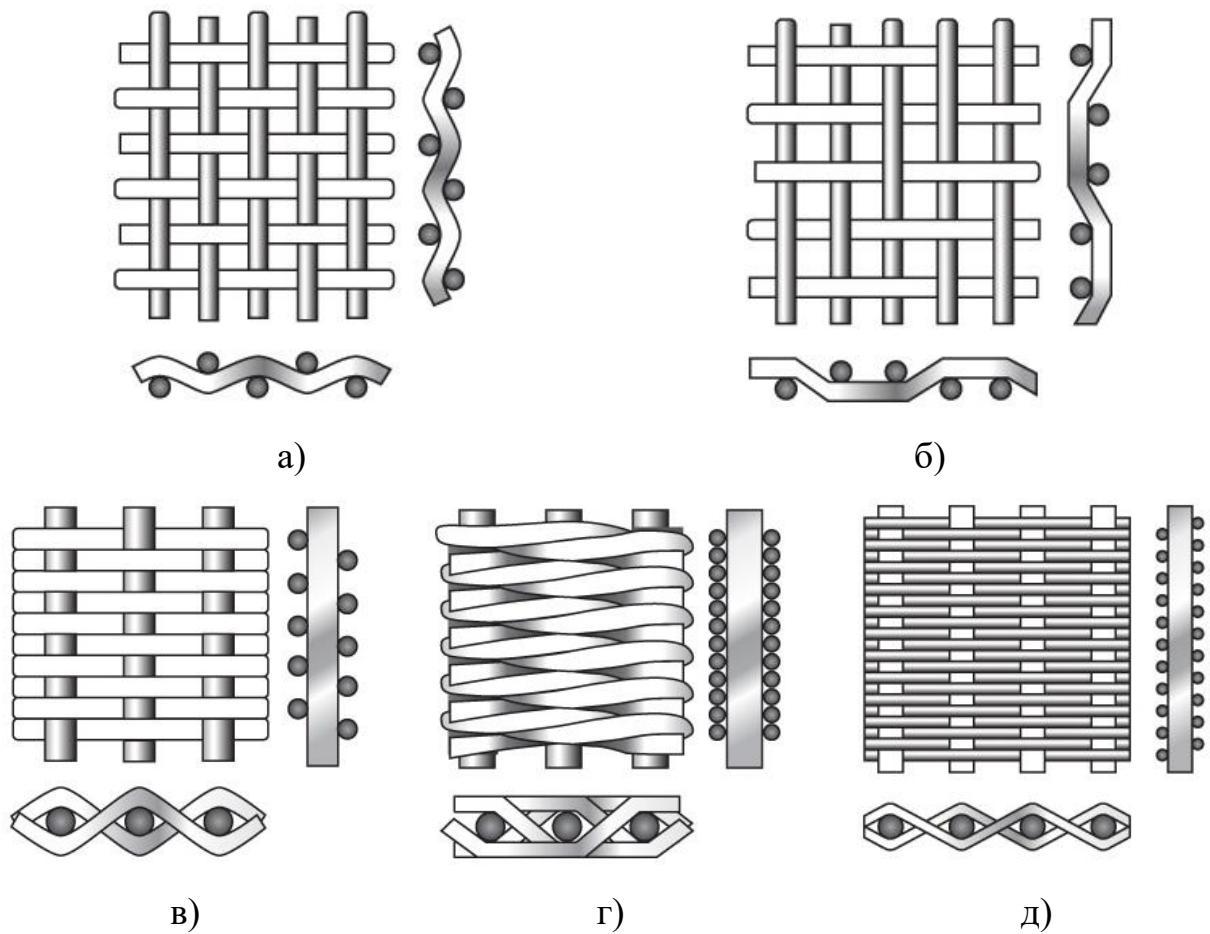


Рис. 1.5. Плетіння (структура) дротяної тканини: а) полотняне; б) саржеве; в) полотняне голландське ; г) саржеве голландське; д) зворотне полотняне голландське [1, 10, 66]

Зворотне полотняне голландське плетіння (Рис. 1.6д) – цей метод та метод полотняного голландського плетіння приблизно однакові, єдина відмінність полягає в тому, що дріт основи та дріт утку розташовані протилежно (діаметр дроту основи менший за діаметр дроту утку). Порівняно з полотняним голландським плетінням, утоковий дріт більшого діаметру сплетений щільніше [1, 10].

Сітки з квадратними чарунками мають більші переваги над «фільтровими сітками» при використанні у капілярних ЗЗС плетіння, що застосовуються у КЛА з РУ, які працюють на висококиплячих КП – це, низьке значення гідравлічних втрат тиску та нижчі вимоги до чистоти КП [1, 10].

У КЛА з РУ, які працюють на низькокиплячих (кріогенних) КП для забезпечення більшого значення КУЗ та вищого ступеня фільтрації, зазвичай, використовують «фільтрові сітки» [1, 10].

Як свідчить наведений вище аналіз призначення та основних типів конструкцій капілярних ЗЗС палива, більшість з них використовує СРФ у якості КРФ. Тому, саме проектні параметри СРФ визначатимуть тактико технічні характеристики (ТТХ) всього капілярного ЗЗС палива. Таким чином, при розробці нових конструкцій капілярних ЗЗС палива, дослідження функціонування СРФ в різноманітних умовах експлуатації КЛА, та створення спрощених математичних моделей реальних фізичних процесів, що відбуваються у сітках при контакті з КП, є перспективною задачею, якій слід приділяти першочергову увагу. Це допоможе досягти оптимальних характеристик капілярних ЗЗС палива та зменшити витрати на їх розробку [1, 10, 67, 68].

Для втілення результатів цих досліджень і розроблених на їх основі математичних моделей у інженерні методики проектування та розрахунку, вони повинні носити фундаментальний характер, та спиратися, в першу чергу, на дані експериментальних випробувань [1, 10, 69]. Це дозволить розрахувати проектні характеристики капілярних ЗЗС палива основним робочим елементом яких є СРФ швидко та з високою точністю, що є актуальною задачею.

Саме такий підхід було використано при отриманні наведених нижче результатів.

1.2. Основні проектні параметри сітчастих розділювачів фаз та вплив на них терміну експлуатації

Оскільки СРФ являють конструкції у вигляді металевих рамок різноманітної конфігурації та розміру, до яких за допомогою вальцювання, зварювання або пайки герметично приєднують металеві ткани сітки з чарунками мікронних розмірів – процес розподілу фаз «рідина-газ» відбувається саме на її поверхні. Застосовувати СРФ доцільно тільки для рідин, що змочуються та мають досить високе значення коефіцієнту поверхневого натягу (σ).

На працездатність сітки і, як наслідок, на її основні проектні параметри впливають: місце розташування СРФ у баку; тип кріплення сітки до металевих рамок «вікон»; розміри «вікон»; параметри сітки (матеріал, тип плетіння та геометричні розміри); КП, що використовується, та його фізико-хімічні властивості.

Як було визначено у підрозділі 1.1 – функціонування СРФ засновано на використанні сил поверхневого натягу (капілярних сил), які перешкоджають прориву у ВМ, як окремих бульбашок газу, так і масового газового фронту, протягом всього часу польоту КЛА, при заданих умовах. Контакт вільної поверхні КП з газом наддуву та твердим матеріалом (тілом), з якого виготовлена сітка, відбувається в її чарунках. Кожну чарунку сітки можна розглядати як окремий капіляр, на якому формується поверхня розділу фаз (ПРФ), так званий «меніск», що під впливом зовнішнього перепаду тиску переміщується всередину чарунки і викривляється до моменту досягнення рівноваги з капілярним тиском, що виникає в результаті дії сил поверхневого натягу [70].

Капілярність – це властивість, притаманна всім рідинам. Вона є проявом взаємодій між молекулами однієї й тієї фази (*когезія*) і між молекулами різних контактуючих фаз (*адгезія*). Таким чином, величина капілярного перепаду тиску (ΔP_k) для довільної форми поверхні розділу фаз «рідина-газ» визначається за рівнянням Лапласа [1, 12, 13, 17, 21, 70 – 73]:

$$\Delta P_k = \sigma \cdot \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) = k \cdot 2 \cdot \sigma \cdot \cos \theta, \quad (1.1)$$

де k – локальна середня кривизна ПРФ, яка визначається вздовж нормалі, спрямованої у газове середовище (Рис. 1.7) і дорівнює для сфери радіусу r – $k = 1/r$, для циліндра – $k = 1/2r$, для площини – $k = 0$; R_1, R_2 – головні радіуси кривизни ПРФ в точці, що розглядається; σ – коефіцієнт поверхневого натягу; θ – контактний кут змочування між ПРФ «рідина-газ» та твердим тілом.

Коефіцієнт поверхневого натягу σ існує для будь-якої пари контактуючих фаз. Він чисельно дорівнює роботі, яку необхідно витратити на утворення одиниці площі поверхні розділу фаз. Коефіцієнт σ істотно залежить від температури та значно зменшується з її зростанням.

Поведінка рідини в умовах невагомості суттєво залежить від рівня змочування нею поверхні твердого тіла. Міра змочування рідиною поверхні твердого тіла визначається контактним кутом змочування θ (Рис. 1.7), який за рівнянням Дюпре-Юнга дорівнює [1, 12, 13, 17, 21, 70 – 73]:

$$\theta = \arccos\left(\frac{\sigma_{г.т} - \sigma_{р.т}}{\sigma_{р.г}}\right), \quad (1.2)$$

де $\sigma_{г.т}$ – коефіцієнт поверхневого натягу границі розділу «газ – тверде тіло»; $\sigma_{р.т}$ – коефіцієнт поверхневого натягу межі розділу «рідина – тверде тіло»; $\sigma_{р.г}$ – коефіцієнт поверхневого натягу межі розділу «рідина – газ» ($\sigma_{р.г} = \sigma$).

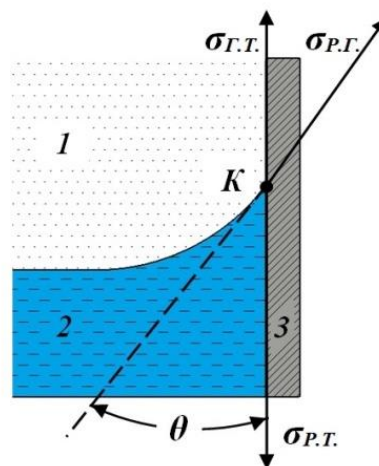


Рис. 1.7. Діаграма сил поверхневого натягу на границі розділу фаз: 1 – газ; 2 – рідина; 3 – тверде тіло; K – точка торкання поверхні рідини з твердою стінкою (тілом) [1, 16]

Виходячи з рівняння (1.2), параметри, що впливають на σ , матимуть вплив і на θ .

Величина θ може змінюватися від 0° до 180° . Вважають, що якщо $\theta < 90^\circ$, то рідина змочує тверде тіло (гідрофільна поверхня); у випадку $\theta > 90^\circ$, спостерігається явище обмеженого змочування (гідрофобна поверхня). У разі $\theta = 0^\circ$, спостерігається явище повного змочування, тобто коли рідина тонким шаром розтікається твердою поверхнею. При $\theta = 180^\circ$, змочування твердої поверхні рідиною відсутнє. Для більшості КП і матеріалів, які застосовуються для виробництва паливних баків, та капілярних ЗЗС КЛА, РРБ РН, має місце явище гарного змочування, тобто контактний кут близький до 0° [17, 74, 75].

Слід відмітити, що θ не залежить від сили тяжіння, оскільки сили $\sigma_{г.т}$, $\sigma_{р.т}$ та $\sigma_{р.г}$ є цілковито молекулярними. Проте необхідно враховувати, що в реальних умовах космічного польоту тверді поверхні елементів капілярних ЗЗС палива оточені хімічно агресивними насиченими парами КП, які внаслідок протікання хімічних реакцій взаємодії можуть абсорбуватися на твердій поверхні і змінювати поверхневий натяг та крайовий кут змочування. Ще один фактор, який здатний вплинути на зміну θ – це температура. З підвищенням температури у разі $\theta > 90^\circ$ контактний кут збільшується, і навпаки для $\theta < 90^\circ$ – контактний кут зі зростанням температури зменшується.

Зі збільшенням тиску газу контактний кут зростає. Також контактний кут має, так званий, статичний гістерезис (або гістерезис змочування), який полягає в зміні контактного кута від початкового значення $\theta_{п}$ при контакті рідини з твердою поверхнею, до кінцевого значення $\theta_{к}$. Однією з причин гістерезису є проникнення рідини в пористий монопрошарок. При русі рідини між двома поверхнями та у капілярах проявляється динамічний гістерезис контактного кута, який визначає силу капілярного тиску. При динамічному гістерезису, під час осушення капіляру значення θ постійно та

дорівнює нулю, а під час заповнення капіляру – значення θ є функцією швидкості і дорівнює [1, 12]:

$$\theta = \arctg \cdot 3,4 \left(\frac{\mu_p \cdot u_p}{\sigma_{p.g}} \right)^{1/3}, \quad (1.3)$$

де u_p – швидкість підйому рідини; μ_p – в'язкість рідини.

Визначити значення контактного кута змочування θ за допомогою рівняння (1.2) практично неможливо, оскільки знайти значення $\sigma_{г.т}$ і $\sigma_{р.т}$ дуже важко із-за наявності на границі розділу фаз «газ – тверде тіло» та «рідина – тверде тіло» плівок окислів. Тому на практиці контактний кут визначають експериментальним шляхом, для кожного варіанту матеріалу твердої поверхні, типу її обробки та рідини [17].

Таким чином, контактний кут змочування θ визначається, як типом КП, так і матеріалом, з якого виготовлена сітка, а коефіцієнт поверхневого натягу σ пов'язаний безпосередньо з фізичними властивостями КП. У підсумку, проникнення газової фази у всередину чарунок СРФ залежить від діючого на ПРФ перепаду тиску, геометричних, структурних і просторових характеристиках сітки, а також фізико-хімічних властивостях рідини та матеріалу сітки [70, 74].

Різниця зовнішніх тисків (ΔP_k), за якої СРФ втрачає свою здатність відокремлювати фази, має назву капілярної утримуючої здатності (КУЗ). КУЗ є найважливішим параметром, що безпосередньо визначає працездатність СРФ. Для сферичної ПРФ він буде розраховуватися за формулою [1, 17, 51, 76]:

$$\Delta P_k = \frac{2 \cdot \sigma}{R}, \quad (1.4)$$

де R – радіус капіляра, що утворює сітка з розміром чарунки δ .

На Рис. 1.8 наведена схема утримання сіткою рідини.

КУЗ може визначатися за висотою гідростатичного стовпа рідини (H). Тиск всередині рідини вздовж вертикальної сітчастої стінки (P_p) змінюється за лінійним законом (Рис. 1.8.) [17]:

$$P_p = P_r - H \cdot \rho \cdot n_x, \quad (1.5)$$

де P_r – тиск газу; ρ – густина рідини; n_x – вісьове перевантаження.

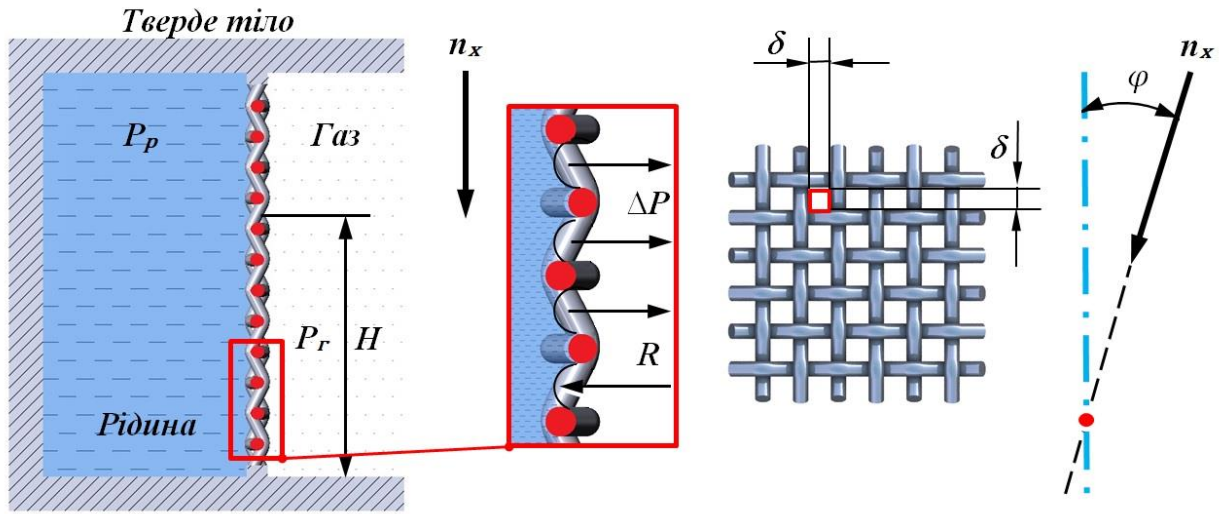


Рис. 1.8. Схема утримання сіткою рідини [17]

На певній висоті різниця між тиском всередині рідини і тиском газу може стати меншою ніж перепад тиску на чарунках сітки за рахунок капілярних сил. У цьому випадку почнеться витікання рідини і прорив газу через сітку. Ця висота рідини отримала назву «закриваючою». Таким чином, сітка утримує рідину, доки капілярний тиск більше за різницю гідростатичних тисків, що діють на найбільш віддалені одна від одної чарунки сітки у напрямку дії навантаження. Ця умова має вигляд [17]:

$$\frac{2\sigma}{R} \geq H \cdot \rho \cdot n_x \cdot \cos\varphi, \quad (1.6)$$

де φ – кут між площиною сітки і напрямом дії перевантаження.

У першому наближенні в якості радіусу капіляра можна прийняти радіус кола, що описаний навколо чарунки з розміром δ , тоді $R \approx 0,707\delta$ і рівняння (1.6) матиме вигляд [17]:

$$\frac{2,83 \cdot \sigma}{\delta} \geq H \cdot \rho \cdot n_x \cdot \cos\varphi. \quad (1.7)$$

Виходячи з цієї умови, можливо визначити «замикаючу» висоту сітки, яка буде дорівнювати [17]:

$$H_{\text{зам.}} = \frac{2,83 \cdot \sigma}{\delta \cdot \rho \cdot n_x \cdot \cos\varphi}, \quad (1.8)$$

або «замикаючу» здібність сітки, яка буде визначатися максимально допустимим розміром чарунки [17]:

$$\delta_{\text{max}} = \frac{2,83 \cdot \sigma}{H_{\text{зам.}} \cdot \rho \cdot n_x \cdot \cos\varphi}. \quad (1.9)$$

Якщо замкнений об'єм рідини перебуває над сіткою, яка розташована вздовж нормалі до вектору дії прискорення ($\varphi = 90^\circ$), то висота стовпа рідини, яку утримує сітка, визначається лише умовою перевищення тиску газу за сіткою над сумою гідростатичних напорів рідини і тиску насичених парів. Для сітчастих капілярів з розміром чарунок $\delta = 80 \div 140$ мкм, така висота практично не залежить від розмірів чарунок і визначається співвідношенням [17]:

$$H_{\text{зам.}} = \frac{P_{\Gamma} - P_s}{\rho \cdot n_x}, \quad (1.10)$$

де P_s – тиск насичених парів рідини.

СРФ, який виготовлено з сітки з квадратними чарунками, можливо розглядати як набір коротких капілярів з квадратним перетином у світлі. Але, на відміну від капілярів, що є довгими трубками з квадратним перетином, стінки капілярів сітки утворені круглими дротами з переплетінням на різних рівнях. За висотою перетин капіляру сітки різко відрізняється від прямокутника чи квадрату: висота капілярів менша розміру довжини стінки; кути створені переплетінням круглих дротів; смуга контакту рідини з твердим матеріалом знаходиться не в одній площині, а рознесена на товщину дроту. Вочевидь, що за такої конфігурації перетину капіляру сітки капілярний тиск у ньому повинен відрізнятися від капілярного тиску у трубці з квадратним перетином [12].

Для усунення цього ускладнення було прийнято, що КУЗ може бути порівняно з деякою геометричною характеристикою порового капілярного каналу, який було названо – еквівалентним капілярним діаметром (ЕКД) пор ($d_{\text{п}}$). Він визначає сепаруючі характеристики матеріалу і розраховується за співвідношенням Кельвина (для капілярного круглого перетину) [1, 76 – 79]:

$$d_{\text{п}} = \frac{4 \cdot \sigma \cdot \cos \theta}{\Delta P_{\text{к}}'}, \quad (1.11)$$

де $\Delta P_{\text{к}}'$ – отримане за результатами експерименту значення КУЗ.

Звідки КУЗ для ЕКД круглого перетину визначатиметься, як [1, 81]:

$$\Delta P_{\text{к}} = \frac{4 \cdot \sigma \cdot \cos \theta}{d_{\text{п}}}. \quad (1.12)$$

Зрозуміло, що у загальному випадку ЕКД не співпадає ні з жодною з характеристик пористих структур, зокрема і сіток. Однак, за результатами аналізу геометричних моделей щільних сіток, можна отримати математичні формули, які дозволяють оцінити значення цього параметру для цих матеріалів. Інакше кажучи, виходячи з залежності (1.11), якщо відоме значення коефіцієнту поверхневого натягу σ і контактного кута змочування θ , можна розрахувати ЕКД для перетину пористих структур, або капілярного каналу будь-якої форми. Аналітично така задача вирішується виключно для отворів найпростіших форм, наприклад, для трикутників та квадратів [1].

Для капілярних каналів з ЕКД трикутної форми КУЗ буде визначатися за формулою [1, 80]:

$$\Delta P_{\text{к}} = \begin{cases} \frac{2 \cdot \sqrt{3}}{\delta} \sigma \cdot \left(\cos \theta + 3^{-\frac{1}{4}} \sqrt{\pi/3 - \theta + 0,5 \cdot \sin 2\theta} \right) & \text{при } \theta < \frac{\pi}{3}; \\ (4 \cdot \sqrt{3} \cdot \sigma \cdot \cos \theta) / \delta & \text{при } \frac{\pi}{3} \leq \theta \leq \frac{\pi}{2}. \end{cases} \quad (1.13)$$

Для капілярних каналів з ЕКД квадратної форми КУЗ визначається з використанням залежності [1, 80]:

$$\Delta P_{\text{к}} = \begin{cases} 2 \cdot \sigma \cdot \left(\cos \theta + \sqrt{\pi/4 - \theta + 0,5 \cdot \sin \theta} \right) / \delta & \text{при } \theta < \frac{\pi}{4}; \\ (4 \cdot \sigma \cdot \cos \theta) / \delta & \text{при } \frac{\pi}{4} \leq \theta \leq \frac{\pi}{2}. \end{cases} \quad (1.14)$$

У формулах (1.13) та (1.14) δ – сторона відповідної геометричної фігури (трикутника і квадрату).

Порівняння формул (1.13) та (1.14) з співвідношенням (1.12) дозволяє зробити висновок щодо впливу контактного куту змочування θ на ЕКД некруглих отворів. Це свідчить про те, що в загальному випадку ЕКД для перетину капілярного каналу не є виключно геометричною характеристикою структури, а залежить від середовищ, які його заповнюють. Також ЕКД для перетину капілярного каналу, залежить не тільки від форми цього перетину, а й від характеру його зміни вздовж осі каналу капіляра [1].

Наведені вище фактори дозволяють стверджувати, що поняття ЕКД капілярного каналу, або пористої структури характеризується деякою умовністю і неоднозначністю, однак, це не заважає його широкому використанню [1, 77 – 79]. Більш того, в більшості випадків ЕКД ототожнюють з відповідним гідравлічним діаметром [1, 77, 81].

Капілярний перепад тиску для СРФ, виконаного із сітки з квадратною чарункою у світлі, визначається за наступним виразом [12]:

$$\Delta P_{\text{к}} = \frac{Bo_{\text{кр}} \cdot \sigma}{b_{\text{чар}}} \cdot \cos \theta , \quad (1.15)$$

де $b_{\text{чар}}$ – характерний розмір чарунки сітки у світлі; Bo – число Бонда.

Умови, при яких порушується рівновага зовнішніх та внутрішніх сил на ПРФ капіляру в квадратній у світлі чарунці сітки визначаються критичним значенням числа Бонда ($Bo_{\text{кр}}$) [12]:

$$Bo_{\text{кр}} = 2,75 - 0,014 \cdot T , \quad (1.16)$$

де T – температура рідини; θ – контактний кут змочування (при $\theta = 0$, $\cos \theta = 1$).

Зазвичай $Bo_{\text{кр}}$ визначаються за допомогою експерименту.

З формули (1.16) видно, що $Bo_{\text{кр}}$ незначним чином залежність від температури рідини [12].

Для металевих сіток з квадратними чарунками у світлі, які використовуються у складі СРФ капілярних ЗЗС палива, що розглядаються – значення $Bo_{кр}$ зазвичай перебувають у межах 1,5...3,5 [82, 83]. Більш точне визначення значення $Bo_{кр}$ суттєво впливає на оптимальність закладених параметрів СРФ при проектуванні капілярних ЗЗС палива, і можливе лише за даними експериментального випробування конкретної сітки та КП, що будуть використані в КЛА, який проектується [1].

Як вже було зазначено раніше, головною умовою розділу фаз за допомогою СРФ є перевищення (або рівність) капілярного тиску на ПРФ КРФ (ΔP_k) над різницею зовнішніх тисків ($\Delta P_{з.т.}$).

$$\Delta P_{з.т.} \leq \Delta P_k . \quad (1.17)$$

Під час космічного польоту КЛА СРФ може працювати, як у режимі розділу фаз, так і у сепаруючому режимі. Рис. 1.9 пояснює фізичну сутність роботи СРФ у складі капілярних ЗЗС палива, яка була описана у працях Де Брока, Регнера, В. Н. Челомея та інших авторів [17, 52, 84]. Газ наддуву потрапляє до газо-рідкісної порожнини резервуару, яка займає більшість його об'єму. Під дією тиску рідина проходить крізь СРФ. Одночасно відбувається її відбір з рідинної порожнини. Це внутрішня порожнина капілярних ЗЗС палива. За конструкцією вона являє відбірний канал з однією чи декількома проникними стінками. Між порожнинами існує різниця тисків, яка залежить від координати Y . У цьому випадку, сумарний перепад зовнішніх тисків на СРФ буде дорівнювати [1]:

$$\Delta P_{з.т.} = \Delta P^h + \Delta P_{г.е.} + \Delta P_{г.к.} + \Delta P_{т.к.} + \Delta P_{д.п.}, \quad (1.18)$$

де ΔP^h – гідростатична різниця тисків на СРФ; $\Delta P_{г.е.}$ – падіння тиску при протіканні рідини скрізь СРФ; $\Delta P_{г.к.}$ – падіння тиску при протіканні рідини по відбірному каналу капілярного ЗЗС палива; $\Delta P_{т.к.}$ – падіння тиску рідини у відбірному каналу капілярного ЗЗС палива, в наслідок швидкісного натиску; $\Delta P_{д.п.}$ – різниця тисків на СРФ, обумовлена динамічними процесами у системі.

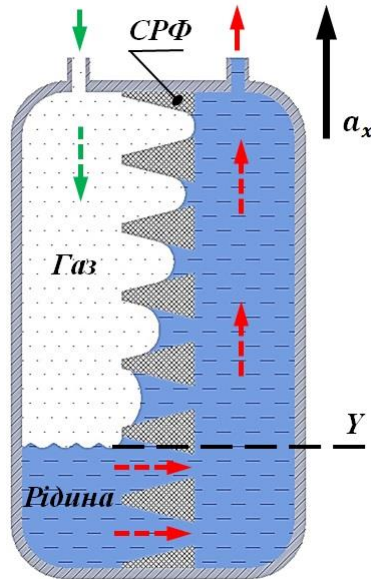


Рис. 1.9. Фізична модель роботи СРФ у складі капілярного ЗЗС [1]

Гідростатична різниця тисків (ΔP^h) обумовлена вагою рідини і дорівнює [1]:

$$\Delta P^h = \rho \cdot [a_x \cdot (Y^* - Y_i)], \quad (1.19)$$

де $(Y^* - Y_i) = H$.

Гідрравлічний опір при протіканні рідини скрізь пористий елемент ($\Delta P_{г.е.}$), є одним з важливих параметрів, що визначають працездатність капілярного ЗЗС палива. У загальному виді, розраховується за формулою [1]:

$$\Delta P_{г.е.} = A \cdot \mu \cdot u_p^+ + B \cdot \rho \cdot u_p^{+2}, \quad (1.20)$$

де u_p^+ – швидкість рідини за екраном, що розділює фази; μ – в'язкість рідини; A та B – емпіричні коефіцієнти, визначені експериментальним шляхом.

Якщо розглядати безпосередньо СРФ з металевої сітки полотняного, чи саржевого плетіння, які мають квадратну геометрію чарунки у світлі, (Рис. 1.10), то гідрравлічний опір при протіканні рідини скрізь сітку ($\Delta P_{г.е.}^c$) буде розраховуватися за формулою [85]:

$$\Delta P_{г.е.}^c = \xi \cdot \frac{\rho \cdot u_1^2}{2}, \quad (1.21)$$

де ξ – коефіцієнт гідрравлічного опору сітки; u_1 – середня швидкість потоку рідини перед сіткою;

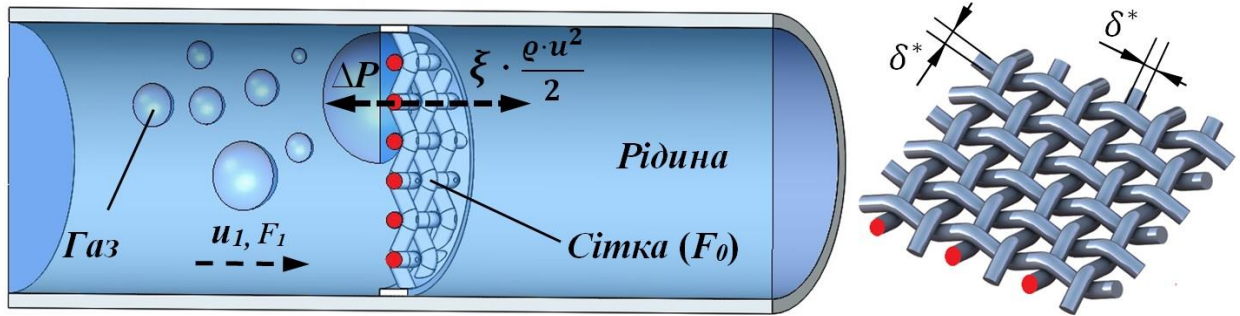


Рис. 1.10. Схема роботи СРФ у потоці рідини [1, 17, 85]

$$\xi = \begin{cases} \frac{22}{Re} + \xi^*, & \text{при } Re < 50 ; \\ k_{Re} \cdot \xi^*, & \text{при } 50 \leq Re < 1000 ; \\ \xi^*, & \text{при } Re > 1000 ; \end{cases} \quad (1.22)$$

де Re – число Рейнольдса; k_{Re} – функція, яка залежить від числа Рейнольдса (визначається за довідником [85]); ξ^* – відносний коефіцієнт гідравлічного опору сітки;

$$Re = \frac{u_0 \cdot \delta^*}{\mu}, \quad (1.23)$$

де u_0 – середня швидкість потоку рідини у живому перетині сітки; δ^* – товщина дроту сітки; μ – в'язкість рідини за відповідної температури;

$$\xi^* = 1,3 \cdot (1 - \bar{f}) + \left(\frac{1}{\bar{f}} - 1\right)^2, \quad (1.24)$$

де \bar{f} – відносна площа «живого» перетину сітки.

$$\bar{f} = \frac{F_0}{F_1} = \frac{\sum f_{\text{чар}}}{F_1}, \quad (1.25)$$

де F_0 – площа «живого» перетину сітки, яка дорівнює сумі площини чарунок сітки ($F_0 = \sum f_{\text{чар}}$); F_1 – площа «живого» перетину елемента конструкції

системи живлення (витратної магістралі, баку, ЗЗС палива та інших) перед сітчастим екраном, в якому формується течія струму рідини.

При цьому мінімально потрібна площа змоченої сітки (при $\theta = 0^\circ$, $\cos \theta = 1$) буде визначається, як [17]:

$$F_{min} = \sqrt{\frac{\xi \cdot Q_0^2 \cdot \rho \cdot b_{чар}}{2.83 \cdot \sigma \cdot 2}}, \quad (1.26)$$

де Q_0 – витрати крізь сітку.

Гідравлічний опір при протіканні рідини по відбірному каналу капілярного ЗЗС палива (в середині порожнини з рідиною) ($\Delta P_{г.к.}$) залежить, зокрема, від його геометричних параметрів, які визначатимуть швидкість переміщення рідини в каналі (u_k). Він може бути знайдений за формулою[1]:

$$\Delta P_{г.к.} = \xi_{г.к.} \cdot \left(\frac{l_k}{d_k}\right) \cdot \left(\frac{\rho \cdot u_k^2}{2}\right), \quad (1.27)$$

де l_k та d_k – довжина та гідравлічний діаметр каналу; $\xi_{г.к.}$ – гідравлічний коефіцієнт опору відбірного каналу.

Падіння тиску рідини у відбірному каналу капілярного ЗЗС палива, внаслідок швидкісного напору ($\Delta P_{т.к.}$), визначається за формулою [1]:

$$\Delta P_{т.к.} = 0,5 \cdot \rho \cdot u_k^2. \quad (1.28)$$

Коли процес рівноважний, різниця зовнішніх тисків на СРФ буде дорівнювати ΔP_k , тому з рівняння (1.17) і (1.18) витікає головна умова штатної роботи СРФ [1]:

$$\Delta P_k \geq \Delta P^h + \Delta P_{г.е.} + \Delta P_{г.к.} + \Delta P_{т.к.} + \Delta P_{д.п.}. \quad (1.29)$$

Додаванням коефіцієнту запасу (k_3) до (1.29) отримується кінцеве рівняння, яке описує роботу СРФ на всіх режимах (утримання та сепарації) при польоті КЛА [1]:

$$\Delta P_k \geq k_3 \cdot (\Delta P^h + \Delta P_{г.е.} + \Delta P_{г.к.} + \Delta P_{т.к.} + \Delta P_{д.п.}). \quad (1.30)$$

При проектуванні капілярних ЗЗС палива та підборі типу плетіння і розміру чарунок сітки, що буде використано у СРФ перед інженером постає складна задача, так як вибрати можливо тільки з тієї номенклатури сіток,

характеристики яких не виходять за межі дуже вузького діапазону, який було закладено у проектних розрахунках та підтверджено результатами експериментального випробування. Розширити цей діапазон для сіток з нульовими чарунками («фільтрових сіток») практично неможливо, оскільки їх мінімальний ЕКД дорівнює приблизно 10 мкм. Це примушує розробників обирати для них дуже незначний коефіцієнт запасу працездатності СРФ. Наприклад, для капілярних ЗЗС палива космічного корабля «Space Shuttle» $k_3 = 1,15$. При використанні сіток полотняного або саржевого типу плетіння з квадратною чарункою у світлі В. В. Багров у [1] пропонує застосовувати коефіцієнт запасу по утримуючій здатності СРФ, який дорівнює $k_3 = 1,5$. В той же час при проектуванні капілярних ЗЗС палива у ДП «КБ» Південне», для сіток полотняного або саржевого типу плетіння з квадратною чарункою у світлі закладають $2 \leq k_3 \leq 3$ [86]. Збільшення коефіцієнту запасу щодо утримуючої здатності СРФ, внаслідок відсутності математичних моделей, що в повній мірі враховують гідродинамічні процеси, які відбуваються у чарунках сітки під час польоту КЛА, у підсумку має негативний вплив на ТТХ, як капілярного ЗЗС палива так і КЛА в цілому.

Аналізуючи наведені вище рівняння (1.12), (1.14), (1.15) та (1.30), що характеризують основні проектні параметри та умови працездатності капілярних ЗЗС палива, до складу яких входять СРФ, можливо виділити, що основними факторами, які впливатимуть на зміну цих параметрів, є:

- а) фізико-хімічні властивості застосованого КП: коефіцієнт поверхневого натягу σ , його густина ρ та в'язкість μ ;
- б) температура КП;
- в) чистота поверхні, та геометричні параметри обраних сіток СРФ (діаметр дроту та розмір чарунок у світлі, або ЕКД);
- г) контактний кут θ змочування палива з матеріалом сітки.

Параметри а), б), в) та г) взаємно залежні один від одного і здійснюють комплексний вплив на КУЗ СРФ.

Також слід відзначити, що практично на всіх етапах польоту КЛА СРФ капілярних ЗЗС палива працюють у динамічних режимах. Під цим мається на увазі вся сукупність випадків, коли різниця перепадів тисків газу та рідини на СРФ (або рідини з обох його сторін) містить, як статичну (повільно змінну за часом), так і динамічну (швидко змінну за часом) складові. Результати випробування деяких конструкцій капілярних ЗЗС палива, або їх моделей [87 – 89] показують, що для характерних умов праці ЗЗС динамічна різниця тисків на СРФ достатньо значна. Відсутність її врахування може обумовити непрацездатність конструкцій. У той же час, в сучасності, відсутній єдиний підхід до визначення характеристик СРФ та всього баку з ЗЗС палива в динамічних режимах, що, вочевидь, пояснюється складністю процесів, які розглядаються. Незважаючи на великий час протягом якого розробляються та використовуються капілярні ЗЗС палива методика розрахунків їх параметрів у динамічних режимах до кінця не розроблена, що ускладнює аналіз ефективності технічних рішень, які приймаються на стадії проектування та конструювання. Основний наголос робиться на експериментальне випробування моделей конструкцій, які вже спроектовано, часто з використанням модельних рідин.

До основних причин, які ведуть до появи динамічної різниці тисків на СРФ слід віднести: вібрації баку разом з рідиною та капілярним ЗЗС палива; низькочастотні коливання у камері згоряння РУ та ВМ; просторові маневри КЛА; спрацьовання елементів запорної арматури; набігання на оточений рідиною СРФ газових включень. У цьому випадку найбільший практичний інтерес, з точки зору характеристик СРФ, що розглядаються, має визначення вібростійкості та динамічної КУЗ.

Недостатність досліджень впливу динамічних процесів на працездатність капілярних ЗЗС палива змушує розробників при їх проектуванні приймати коефіцієнт запасу для утримуючої здатності СРФ $1,3 \leq k_3 \leq 1,5$ від значення статичної КУЗ [88].

Таким чином, вибір оптимальної сітки, яка забезпечить максимальне значення КУЗ за мінімально можливого значення коефіцієнта запасу для утримуючої здатності СРФ та мінімальних гідравлічних втратах тиску під час протікання КП крізь СРФ – є однією з важливих задач, що має безпосередній вплив на ефективність та працездатність всієї конструкції капілярного ЗЗС палива, що розробляється.

Визначенню основних проектних параметрів капілярних ЗЗС палива, до складу яких входять СРФ: КУЗ, ЕКД, коефіцієнтів гідравлічного опору для різноманітних конструкцій КРФ тощо, присвячено велика кількість науково-дослідних робіт, як вітчизняних, так і закордонних авторів.

У статті [90] запропоновано підхід до визначення коефіцієнта динамічного навантаження СРФ капілярних ЗЗС палива при русі КЛА на пасивній ділянці траєкторії, що дозволяє оптимізувати вибір динамічної КУЗ цих засобів.

У роботі [91] за результатами експериментальних робіт було встановлено зв'язок між швидкістю рідини, яка проходить крізь СРФ та швидкістю руху вільної поверхні стовпа рідини.

У статті [92] наведено математичну модель прориву газової фази крізь СРФ капілярних ЗЗС палива КЛА. Також були запропоновані залежності для визначення втрат тиску на СРФ під час різних фаз процесу проникнення крізь нього газу.

У статті [93] наведено методику інженерної оцінки КУЗ СРФ капілярних ЗЗС палива за умов імпульсної зміни значень тиску у паливі, які виникають на перехідних ділянках роботи РУ КЛА. За цією методикою для оцінки працездатності СРФ пропонується використовувати залежність:

$$\Delta p_e \leq k \cdot \left(\Delta p_i + \Delta p_{cfr} \cdot e^{-C \cdot \frac{\Delta p_i}{\Delta p_{cfr}}} \right), \quad (1.31)$$

де k – коефіцієнт запасу працездатності СРФ; Δp_i – амплітуда імпульсної зміни тиску; Δp_{cfr} – статична КУЗ; C – емпірична константа, яка

залежить від конструкції СРФ (у випадку, коли СРФ міститься на жорсткій опорі $C = 0,5$).

У статті [94] наведено результати експериментальних досліджень впливу коефіцієнту пружності СРФ на КУЗ;

У статті [95] наведено результати експериментальних досліджень впливу змінного за часом тиску на втрату КУЗ СРФ.

У статті [96] дослідив перепад тисків на СРФ капілярних ЗЗС палива на перехідних ділянках роботи РУ КЛА.

У статті [97] наведено результати експериментальних досліджень по визначенню динамічної КУЗ капілярних ЗЗС палива до складу яких входить СРФ. Пропонується напівемпірична залежність для визначення цього проектного параметра при проведенні інженерних розрахунків (Рис. 1.11).

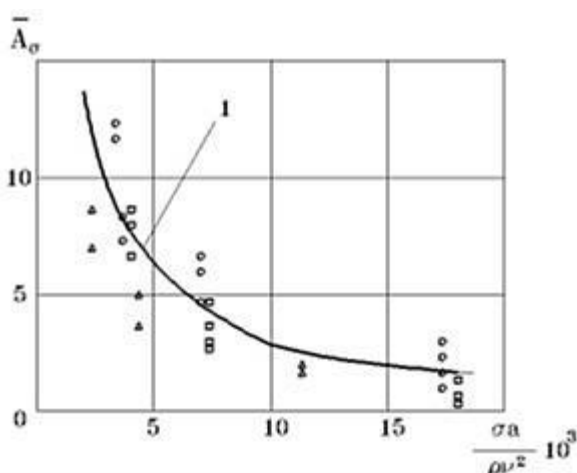


Рис. 1.11. Залежність відносної динамічної КУЗ ($\bar{A}_\sigma = \frac{A}{\sigma} = C Sa^\beta$, де C і β – деякі константи) від фізичних властивостей рідини і геометрії СРФ (капілярного числа $Sa = \frac{\sigma a}{\rho v^2}$): 1 – апроксимуюча крива; Δ – фреон 113; \square – бензин Б – 70; \odot – гептан [97]

У статті [98] наведено інженерну методику розрахунку динамічної КУЗ СРФ, що дозволяє на етапі ескізного проектування визначити працездатність капілярних ЗЗС палива в динамічних умовах. За цією методикою для оцінки динамічної КУЗ СРФ пропонується використовувати залежність:

$$A_{\sigma} = \pi\sigma (r_c^M)^2 \left(\sum_{i=1}^{M-1} \left(2 \left(1 - \sqrt{1 - (\bar{r}_c^i)^2} \right) - (\bar{r}_c^i)^2 \right) N_i + (2\bar{l}_c + 1)N_m \right), \quad (1.32)$$

де \bar{r}_c^i та \bar{l}_c – приведені радіус та довжина капіляру, відповідно ($\bar{r}_c^i = \frac{r_c^i}{r_c^M}$, $\bar{l}_c = \frac{l_c}{r_c^M}$); N_i – загальна кількість чарунок, певного i -го класу; N_m – кількість чарунок з приведеним радіусом r_c^M на СРФ одиничної площі.

У роботах [99] та [100] наведено результати експериментального дослідження впливу коефіцієнта пружності СРФ на КУЗ [99] та розроблена методика інженерного розрахунку коефіцієнта зниження статичної КУЗ СРФ полотняного типу плетіння при зростанні її пружності у «вікнах» розділювальної перегородки у баках КЛІА [100]:

$$K_{yc} = \frac{a_0}{a_{\max} + d_0 \psi Q^* \bar{E} \cdot \bar{a}_{\min}}, \quad (1.33)$$

де a_0 та d_0 – сторона чарунки сітки та діаметр дроту у деформованому стані, відповідно; \bar{a}_{\min} – коефіцієнт пружності сітки; a_{\max} – довжина сторони чарунки сітки, яка відповідає \bar{a}_{\min} ; Q^* – емпіричний коефіцієнт; \bar{E} – модуль пружності Юнга; ψ – коефіцієнт Пуассона.

У статті [101] наведено результати експериментальних досліджень роботи капілярних ЗЗС палива до складу яких входить СРФ, в умовах руху палива вздовж сітчастої поверхні, що знаходиться у контакті з газовою фазою. А у статті [102] автором представлена методика інженерної оцінки зниження КУЗ СРФ внаслідок руху палива сітчастої поверхні, що контактує з газовою фазою. За цією методикою КУЗ СРФ визначається за формулою:

$$\Delta p_{cfr}^* = k_c \Delta p_{crf}, \quad (1.34)$$

де Δp_{crf} – статичне значення КУЗ СРФ ($\Delta p_{crf} = \frac{4\sigma}{d_c}$); k_c – розрахунковий коефіцієнт зниження КУЗ СРФ, який дорівнює:

а) для СРФ виготовлених з сіток полотняного типу переплетіння:

$$k_c = 0,086 \text{Re}^{-0,375} \text{Ca}^{0,326}, \quad (1.35)$$

б) для СРФ виготовлених з «фільтрових сіток»:

$$k_c = 0,33Re^{-0,14}Ca^{0,1} , \quad (1.36)$$

де d_c – ЕКД чарунок СРФ; Re , Ca – число Рейнольдса та капілярне число, відповідно.

У статті [103] проведено аналіз процесу взаємодії поверхні розподілу «рідина – газ» з тканною металевою сіткою СРФ капілярного ЗЗС палива. Розглянуто вплив зміни фізичних властивостей палива у тонких плівках на динамічну КУЗ СРФ.

У статті [104] представлено теоретичний аналіз впливу на коефіцієнт гідравлічного опору СРФ, рівня нестационарності рідинного потоку, що протікає через них. А у статті [105] автором представлено результати експериментального дослідження коефіцієнту гідравлічного опору СРФ у нестационарному потоці рідини на етапі вмикання РУ КЛА. За результатами цих робіт було розроблено інженерну методику оцінки гідравлічних втрат тиску на СРФ, за умов суттєво нестационарного рівня витрат рідини:

$$\xi = \alpha + \frac{\beta}{Re} + \frac{C}{Fr^\lambda} , \quad (1.37)$$

де α , β , C та λ – емпіричні константи, які залежать від типу СРФ, що використовується.

У циклі статей [106 – 109], та в дисертаційній роботі [96] представлено результати експериментальних і розрахунково-аналітичних робіт по встановленню впливу деформованості структури переплетення дротів сіток на зміну проектних параметрів СРФ капілярних ЗЗС палива. Розроблена нова математична модель визначення ЕКД для сіток з квадратною чарункою у світлі.

У дисертаційній роботі [12] представлено результати експериментальних і розрахунково-аналітичних робіт по дослідженню КУЗ СРФ. Внаслідок цих робіт було запропоновано при експериментальному визначенні КУЗ для СРФ з квадратною чарункою сітки у світлі застосовувати показник критичного значення числа Бонда, за якого порушується рівновага

зовнішніх та внутрішніх сил на ПРФ капіляру в чарунці сітки (формули (1.15) та (1.16)).

У [82], за результатами експериментальних досліджень, було встановлено умови рівноваги зовнішніх та внутрішніх сил на ПРФ капіляру в чарунці сітки, яка для сіток з квадратною чарункою у світлі та круглим перетином дроту, характеризується за допомогою числа Бонда:

$$Bo \leq 2. \quad (1.38)$$

При цьому результати експериментів свідчать, що критичне значення числа Бонда ($Bo_{кр}$), при якому умови рівноваги зовнішніх та внутрішніх сил на ПРФ капіляру в чарунці сітки порушуються (в залежності від модельної рідини) знаходиться у діапазоні 1,5...3,5 [82, 83].

У циклі статей [110 – 130] представлено результати багаторічних експериментальних і розрахунково аналітичних робіт по встановленню ключових параметрів, які впливають на КУЗ СРФ капілярних ЗЗС палива РУ, що працюють на криогенних КП. Експериментальні випробування були проведені у дослідницькому центрі NASA Glenn (Клівленд, штат Огайо), на установці Cryogenic Components Cell 7 (CCL-7). У якості модельних рідин було використано: рідкий гелій, рідкий водень, рідкий азот, рідкий аргон, рідкий кисень, рідкий метан, бінарну суміш метанол/вода тощо. При цьому були задіяні: автогенна (газоподібний метан), або неконденсаційна (газоподібний гелій, чи азот) схеми тисків наддуву. Об'єктами дослідження були переважно сітки щільного «фільтрового типу». У процесі експериментів вивчався вплив зміни, у широкому діапазоні, термодинамічного стану рідини та газу (температури, тиску, швидкості течії) на параметри ПРФ та, як наслідок, на КУЗ. Досліджувалася зміна: міжфазної температури на ПРФ змоченої сітки, числа Рейнольдса при протіканні рідини крізь пори сітки, гідравлічного опору сітки, масової швидкості конденсації, та/або випаровування під час руйнування ПРФ у порах сітки, а також, теплових потоків, в залежності від схеми тиску, що була використана. Вимірювалися: поля швидкості та тиску на СРФ капілярних ЗЗС палива. Було проведено

збір, порівняння та аналіз результатів подібних експериментів, що проводили інші дослідники [131 – 153]. В результаті проведених робіт було визначено сімку параметрів, які безпосередньо впливають на КУЗ СРФ капілярних ЗЗС кріогенного палива, це: поверхневий натяг рідини, контакт кут змочування, діаметр пор сітки, температура рідини, ступінь переохолодження, тип і температура газу наддуву. Та розроблена математична модель визначення КУЗ для кріогенних рідин:

$$\Delta P_{BP} = \frac{4\sigma_{LV} \cdot \cos\theta_C}{D_P} n_{sat} \left(1 + n_{Sab} \left(\frac{P - P_{Sat}}{P_{critical}} + \frac{T_{Sat} - T}{T_{critical}} \right) \right) \times (1 - n_{Hot}(T_{Gas} - T)), \quad (1.39)$$

де σ_{LV} – коефіцієнту поверхневого натягу на ПРФ «рідина – газ»; θ_C – контактного куту змочування; D_P – ЕКД пор сітки при референтному значенні температури; n_{sat} – безрозмірний параметр профілю насичених парів; n_{Sab} – безрозмірний параметр профілю переохолодженої рідини; P – тиск; P_{Sat} – тиск насичених парів; $P_{critical}$ – критичне значення тиску, при якому відбувається порушення суцільності ПРФ; T – температура ; T_{Sat} – температура насичених парів; $T_{critical}$ – критичне значення температури, при якому відбувається порушення суцільності ПРФ; n_{Hot} – безрозмірний параметр профілю теплого стисненого газу ; T_{Gas} – температура газу.

У наукових роботах [154 – 161], та у дисертації [12] представлено результати експериментальних і розрахунково аналітичних робіт з визначення ЕКД пор та КУЗ мікронних металевих сіток з квадратними чарунками у світлі, переважно полотняного та саржевого типів переплетіння дротів.

У наукових роботах [162 – 166] представлено результати експериментальних робіт з визначення гідравлічних втрат тиску при протіканні модельної рідини крізь чарунки СРФ, які вироблені із металевих сіток з квадратними чарунками у світлі та щільних «фільтрових сіток», а також наведені результати розрахунково аналітичних робіт по визначенню емпіричних залежностей коефіцієнту гідравлічного опору для цих сіток.

У наукових довідниках [77, 78, 85, 167] приведені основні емпіричні розрахункові залежності для визначення коефіцієнту гідравлічного опору сіток в залежності від коефіцієнта «живого» перетину.

Розглянуті роботи свідчать, що визначення основних проектних параметрів капілярних ЗЗС палива, та їх зміни під впливом різноманітних факторів (процесів та умов), є актуальною задачею. Однак, перелічені експериментальні і розрахунково аналітичні роботи не враховують вплив на зміну проектних параметрів капілярних ЗЗС палива терміну їх експлуатації у складі паливної системи КЛА.

На сьогодні, КЛА які мають тривалий термін експлуатації (ШСЗ телекомунікаційного зв'язку, дослідницькі супутники, космічні станції, космічні телескопи, тощо), зазвичай, у якості палив для живлення маршових та допоміжних (управляючих) РУ використовують висококиплячі КП, наприклад, такі як [34, 35, 168 – 175]:

- однокомпонентні: перекис водню, нітрометан, азотний тетраоксид, гідразин, монометилгідразині, диметилгідразині, несиметричний диметилгідразині, LMP-103s та інших;

- двокомпонентні пари: гідразин – тетраоксид діазоту, монометилгідразин – тетраоксид діазоту, диметилгідразин – тетраоксид діазоту, несиметричний диметилгідразин – тетраоксид діазоту та інших.

Таким чином, у КЛА, які мають тривалий термін експлуатації під впливом хімічно агресивних КП, можуть змінюватися проектні параметри СРФ капілярних ЗЗС. Зазначена проблема також притаманна дослідницьким супутникам, космічним буксирам та деяким типам РРБ ракет-носіїв (РН), які могли тривалий термін перебувати в очікуванні запуску під впливом компонентів ракетного палива та їх парів (наприклад, РРБ РН «Дніпро»).

Надалі розглядатимемо саме зміну КУЗ СРФ капілярних ЗЗС палива, внаслідок тривалого терміну перебування їх основних робочих елементів (металевих сіток саржевого типу переплетіння дротів, з квадратною

чарункою у світлі) під впливом хімічно агресивних КП: несиметричного диметилгідразину (НДМГ) і азотного тетраоксиду (АТ), та їх парів.

На початковому етапі проектування капілярних ЗЗС палива розробниками збираються й аналізуються данні щодо фізичних характеристик КП, які наведені у довідковій літературі. Ці фізичні властивості отримані для речовин, які були піддані максимально можливому очищенню. Однак, КП – це продукти багатотоннажних хімічних виробництв, і в них, в залежності від похідної сировини та технології, можуть перебувати домішки, які впливають на характеристики, що цікавлять розробників: густину, в'язкість, коефіцієнт поверхневого натягу та контактний кут змочування. Більш того, наявні численні фактори, які можуть змінювати значення цих параметрів. До них можна віднести: температуру, забруднення КП та поверхні СРФ, розчинність газу. Забруднення матеріалу сіток під час їх виготовлення, транспортування, зберігання. Забруднення під час виготовлення з сіток елементів СРФ та їх подальшого монтування до паливної системи КЛА, її заправки КП та подальшої тривалої експлуатації в складі КЛА. Під час якої, можливе, утворення на поверхні дроту сіток: плівок, гелів, опадів внаслідок хімічного розпаду КП та корозійних процесів. Все це, може вплинути на геометричні параметри чарунок сітки, значно збільшити значення контактного куту змочування і таким чином, сприяти критичному зменшенню КУЗ СРФ капілярного ЗЗС палива [1].

На необхідність і важливість вивчення цього питання (зміну проектних параметрів капілярних ЗЗС палива в залежності від терміну їх перебування у КП) наголошував В. В. Багров у труді [1]. Оскільки, якщо коефіцієнт поверхневого натягу однозначно визначається типом речовин і термодинамічними характеристиками системи, то для визначення контактного куту змочування цих параметрів недостатньо. Значення θ значною мірою залежить від стану поверхні твердого тіла: шорсткості, степені забруднення, присутності оксидів, знаходженню на поверхні

твердого тіла тонких плівок інших речовин, які мають свої значення σ , та інших важко контрольованих факторів [1].

В той же самий час, контактний кут змочування, маючи значний вплив на ЕКД пор і, як наслідок, на КУЗ СРФ капілярного ЗЗС палива є дуже важливим параметром, від якого в значній мірі залежить процес втрати стійкості на межі ПРФ «газ – рідина». Для конструкцій капілярних ЗЗС палива, що розглядаються, в окремих випадках, це явище визначає їх працездатність. Тому значення θ та його стабільність потребують дуже ретельного дослідження та постійного контролю на всіх етапах виробництва та експлуатації СРФ капілярного ЗЗС палива [1].

Підкреслимо, що абсолютна більшість КП добре змочують конструкційні матеріали (нержавіючу сталь, титанові та алюмінієві сплави), тобто мають стабільне значення $\theta = 0$. Виключенням є гідразин та деякі його алкілзаміщені похідні (монометилгідразин, НДМГ та інш.), для яких отримання нульового значення θ потребує дотримання жорстких норм чистоти та спеціальної обробки [1, 11, 12, 21, 73, 87, 176 – 179]. Тому рідина, що використовується, також повинна характеризуватися стабільним значенням $\theta = 0$ і бути не чутливою до забруднень СРФ, які не виключені при тривалому терміні їх перебування у КП та під їх парами [1].

При проектуванні капілярних ЗЗС палива розробниками у більшості випадків значення контактного куту змочування θ для НДМГ та АТ приймається рівним нулеві, без врахування його ймовірної зміни протягом тривалого терміну експлуатації у складі паливної системи КЛА [1, 11, 12, 21, 73, 87]. В окремих технічних звітах NASA присутні данні експериментальних досліджень, які свідчать про те, що в деяких випадках значення θ для ПРФ «НДМГ-нержавіюча сталь» може дорівнювати 25° . Також зазначається, що для гідразину воно може змінюватися у межах $4...55^\circ$, а для монометилгідразину у межах $1...7^\circ$ [1] (в окремих джерелах наведено, що значення θ для монометилгідразину сягає 55° і навіть 67° [125, 145, 149]). Для АТ більшість довідників встановлюють межі зміни значення $\theta - 0...2^\circ$ [1, 12, 21, 74].

Аналогічним чином, при проектуванні капілярних ЗЗС палива розробниками зазвичай, не враховується можлива зміна геометричних характеристик чарунок сітки внаслідок корозійних процесів, та її засмічення і забиття продуктами хімічного розпаду КП, при тривалому терміні експлуатації у складі паливної системи КЛА.

За даними наведеними у наукових джерелах – швидкість корозії основних конструкційних матеріалів у безводному товарному НДМГ характеризується черговими значеннями (за температурою 30°C), мм на рік: алюміній та його сплави 0,0025...0,0125; молувуглецеві сплави 0,0025...0,0075; леговані сталі 0,0025 [173, 180]; нержавіючі сталі $\leq 1 \cdot 10^{-4}$ (за температурою 50°C) [181 – 186].

Швидкість корозії основних конструкційних матеріалів у АТ характеризується черговими значеннями, мм на рік: алюміній та його сплави 0,0025; хромісті сталі 0,025...2; хромнікелеві сталі 0,002...0,003 [173, 187, 188]; сталі 0,25; нержавіючі сталі 0,01 [171, 189]; нержавіючі сталі $\leq 1 \cdot 10^{-4}$ (за температурою 50°C) [181 – 186].

Такий значний розкид значень відносно θ та швидкості корозії, отриманий різними авторами, обумовлено, скоріше за все, різницею в умовах проведення експериментальних досліджень, до яких можуть відноситися: якість очищення модельної рідини, присутність в ній різноманітних стабілізуючих домішок, якість обробки та очищення конструкційного матеріалу сіток, відносні похибки визначення питомих параметрів, та інше.

Тому можливо стверджувати, що проведення експериментальних випробувань з визначення зміни проектних параметрів капілярних ЗЗС палива в залежності від терміну їх експлуатації допоможе провести уточнення існуючих напівемпіричних математичних моделей і методик розрахунків, що, у свою чергу, дозволить проводити більш точний й оптимальний вибір: типу конструкційного матеріалу СРФ, значення коефіцієнту запасу по КУЗ СРФ і загальних ТТХ капілярного ЗЗС палива,

який розробляється, зменшивши, при цьому загальні часові та матеріально технічні витрати при наступних експериментальних випробуваннях.

1.3. Висновки за розділом 1

З викладених у розділі 1 матеріалів, щодо аналізу призначення, основних типів конструкцій і проектних параметрів СРФ капілярних ЗЗС палива, та впливу на них тривалого терміну експлуатації у складі паливної системи КЛА, РУ якого має за потребу необхідність багаторазового запуску двигуна в умовах невагомості (мікрогравітації), можна зробити такі висновки:

1. Проведено аналіз типів конструкцій ЗЗС палива. Відзначено, що ефективним способом забезпечення подачі КП на вхід до РУ без наявності в ньому газової фази, та можливості її багаторазового запуску в умовах невагомості (мікрогравітації), є капілярні ЗЗС палива, до складу яких входять СРФ. Проаналізовано типи сіток, що використовуються у складі СРФ і з'ясовано, що для висококиплячих КП (таких як АТ та НДМГ) найбільш ефективними є сітки саржевого (або полотняного) типу плетіння з квадратною чарункою у світлі.

2. Розглянуто основні проектні параметри, що визначають працездатність СРФ капілярних ЗЗС палива. До них належить статична та динамічна КУЗ, що відповідає за максимальний перепад статичного або динамічного тиску, за якого не відбувається проникнення крізь чарунки сітки газової фази, а також гідравлічні втрати тиску, що виникають при протіканні компоненту палива крізь СРФ. При проектуванні КУЗ намагаються максимізувати, але таким чином, щоб гідравлічні втрати тиску, навпаки, були мінімальними.

3. Проаналізовано багаточисленні літературні джерела і з'ясовано, що визначення основних проектних параметрів капілярних ЗЗС палива, та їх зміни під впливом різноманітних факторів (процесів та умов), є актуальною задачею. Проте, у відомих роботах відсутні дослідження впливу на

параметри капілярних ЗЗС палива та КУЗ тривалого терміну їх експлуатації у складі паливної системи КЛА.

4. Показано, що на зміну основного проектного параметра КУЗ СРФ капілярних ЗЗС палива під час тривалого терміну їх експлуатації у складі паливної системи КЛА впливають корозійні процеси, наслідки яких призводять до зміни геометричних характеристик чарунок сітки та контактного куту змочування між ПРФ «рідина-газ» та конструкційним матеріалом сітки СРФ. Таким чином, дослідження закономірностей зміни проектних параметрів СРФ в залежності від терміну дії на їх конструкційні матеріали компонентів рідких ракетних палив: АТ та НДМГ і уточнення методик їх розрахунку та проектування, є актуальною та своєчасною науковою задачею.

Основні матеріали розділу 1 було відображено автором у роботах [10, 86, 168, 169, 192 – 197].

РОЗДІЛ 2

ВИЗНАЧЕННЯ ШВИДКОСТІ КОРОЗІЇ ОСНОВНОГО КОНСТРУКЦІЙНОГО МАТЕРІАЛУ СІТЧАСТИХ РОЗДІЛЮВАЧІВ ФАЗ

Сучасні активні КЛА тривалий час функціонують в космічному просторі, при цьому в баках упродовж усього терміну активного існування містяться компоненти палива, які використовуються для роботи РУ. Оскільки баки перебувають у заправленому стані, під впливом агресивних палив (АТ та НДМГ) і їх парів протягом тривалого часу можуть змінюватись проектні параметри СРФ капілярних ЗЗС палива.

Враховуючи, що функціонування СРФ засновано на капілярних силах, що діють у чарунках сітки на межі розділу фаз «рідина – газ», основним параметром, який визначає їх працездатності є КУЗ. Вона залежить від розміру чарунки, матеріалу дротів та чистоти їх поверхні, типу та температури КП [1, 12, 17]. При тривалому впливі агресивних палив (АТ та НДМГ) і їх парів на СФР, внаслідок корозійних процесів матеріалу сіток, відбувається зміна геометричних розмірів дроту та чарунок сітки та утворення на поверхні проволоки сіток плівок, гелів, опадів. Це може призвести до критичного зниження КУЗ. Таким чином, необхідно дослідити вплив корозії на основний конструкційний матеріал СФР, і насамперед, визначити її швидкість.

2.1 Корозія металів, класифікація корозійних процесів

Корозія металів – це мимовільне руйнування металів в наслідок хімічної, або електрохімічної взаємодії їх з зовнішнім середовищем. Корозійний процес – гетерогенний (неоднорідний), протікає на межі розподілу фаз метал – агресивне середовище, має складний механізм. При цьому, атоми металу окислюються, тобто втрачають валентні електрони, атоми переходять через межу розподілу в зовнішнє середовище, та взаємодіють з її компонентами і утворюють продукти корозії. У більшості випадків корозія металів відбувається нерівномірно по поверхні, тобто утворюються ділянки, на яких виникає локальне ураження. Деякі продукти корозії

утворюють поверхневі плівки і таким чином, надають металу корозійної стійкості. Іноді можуть з'являтися пухкі продукти корозії, що мають слабе щеплення з металом. Руїнування таких плівок викликає інтенсивну корозію металу, що оголюється. Корозія металу знижує механічну міцність і змінює інші його властивості. Корозійні процеси класифікуються за видами корозійних руїнувань, характером взаємодії металу з середовищем, умовами течії [198 – 204].

Корозія буває: суцільна, загальна і місцева. Суцільна корозія протікає по всій поверхні металу. При місцевій корозії ураження локалізуються на окремих ділянках поверхні. Загальна корозія розподіляється на рівномірну, нерівномірну та вибірккову [198 – 204].

На Рис. 2.1 наведено схематичне зображення характеру корозійних руїнувань.

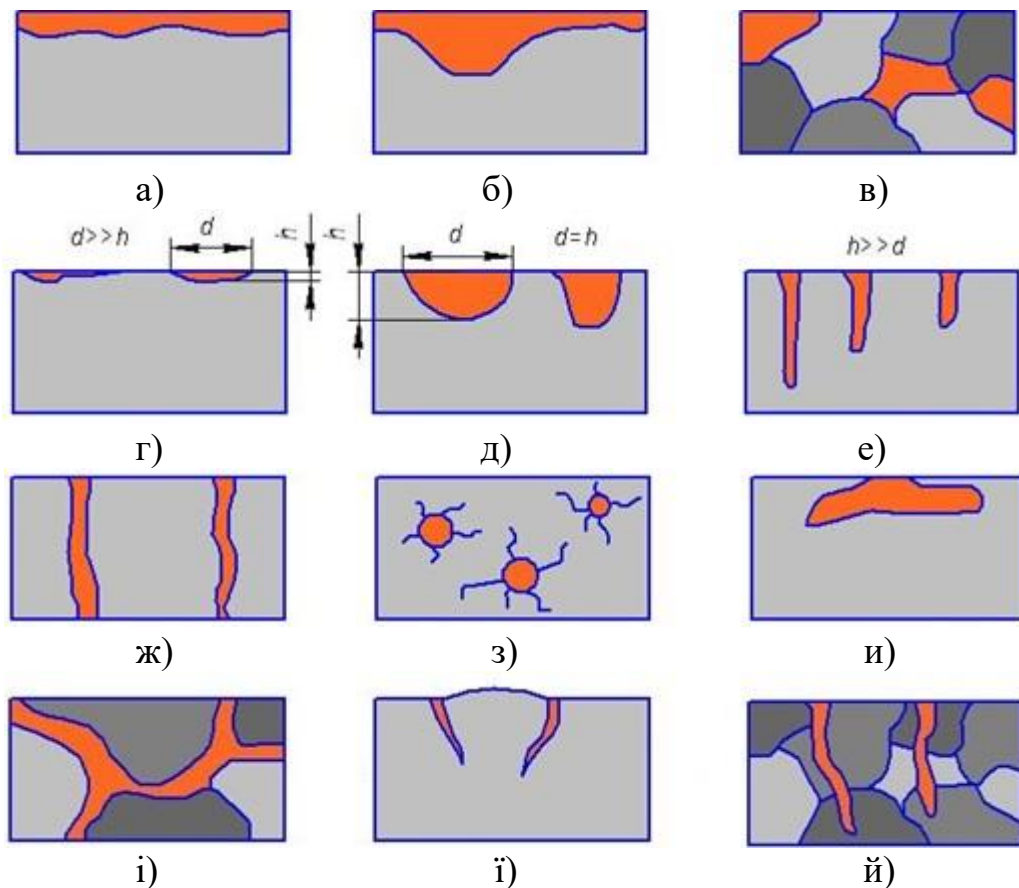


Рис. 2.1. Схематичне зображення характеру корозійних руїнувань: а) – рівномірні; б) – нерівномірні; в) – вибірккові; г) – плямами; д) – вирізки; е) – пітінги; ж) – наскрізні; з) – ниткоподібні; и) – підповерхневі; і) – міжкристалічні; ї) – ножові; й) – розтріскування; d та h – діаметр та глибина корозійних руїнувань [198 – 204]

Рівномірна корозія протікає з однаковою швидкістю всією поверхнею металу; нерівномірна – відбувається на різних ділянках поверхні металу з неоднаковою швидкістю. При вибірковій корозії руйнуються окремі компоненти сплаву.

При корозії плямами діаметр корозійних вражень більше їх глибини. Для виразкової корозії характерне глибоке враження ділянки поверхні обмеженої площі. При пітінговій корозії спостерігаються окремі точкові враження поверхні металу, які мають малі поперечні розміри за значної глибини. Наскрізна – це місцева корозія. Яка спричиняє руйнування металевого виробу наскрізь, у вигляді свищів. Ниткоподібна корозія проявляється під неметалевим покриттям у вигляді ниток. Підповерхнева корозія починається з поверхні та починає розповсюджуватися переважно під поверхнею металу і викликає його спучування й розшарування.

При міжкристалічній корозії руйнування зосереджені на межах зерен металу. Ножова корозія має вигляд надрізу ножем повздовж зварного з'єднання у сильно агресивних середовищах. Корозійне розтріскування протікає при одночасному впливі корозійного середовища і розтягувальних остаточних, чи прикладених механічних навантажень.

За характером взаємодії металу з середовищем розрізняють хімічну і електрохімічну корозію. Хімічна корозія – руйнування металу при хімічній взаємодії з агресивним середовищем, у ролі якої виступають неелектроліти – рідини і сухі гази. Електрохімічна корозія – руйнування металу під впливом електроліту при течії двох самостійних, але поєднаних процесів – анодного і катодного.

Визначення можливості протікання корозії, як і будь-якого хімічного або електрохімічного процесу, можливо за зміною ізобарно-ізотермічного потенціалу – вільної енергії Гіббса (ΔG), яка визначається рівнянням [198 – 204]:

$$\Delta G = -RT \cdot \ln K_{\text{рівн}}, \quad (2.1)$$

де R – універсальна газова стала; T – абсолютна температура; $K_{\text{рівн}}$ – константа рівноваги реакції.

Мимовільно протікають лише ті процеси, у результаті яких відбувається зменшення енергії Гіббса, тобто $\Delta G < 0$. Якщо $\Delta G > 0$ – протікання корозійного процесу неможливо. Система перебуває в рівновазі, коли $\Delta G = 0$.

Термодинамічний розрахунок дозволяє лише визначити можливість чи неможливість протікання корозії. Проте він не надає реальної уяви щодо швидкості корозії, яка має першорядне практичне значення. Реальна швидкість корозії визначається багатьма факторами: станом поверхні метала і особливостями його структури; температурою; складом і швидкістю руху корозійного середовища; пружним станом матеріалу тощо. Тому немає абсолютних показників корозійної стійкості металів. Існує лише порівняльні данні, які відповідають конкретним умовам корозії [194 – 204].

За статистичними даними швидкість корозії основних конструкційних матеріалів у безводному товарному НДМГ характеризується наступними значеннями (за температури 30°C), мм на рік: алюміній та його сплави 0,0025...0,0125; маловуглецеві сплави 0,0025...0,0075; леговані сталі 0,0025 [173, 180]; нержавіючі сталі $\leq 1 \cdot 10^{-4}$ (за температури 50°C) [181 – 186].

Швидкість корозії основних конструкційних матеріалів у АТ складає, мм на рік: алюміній та його сплави 0,0025; хромісті сталі 0,025...2; хромнікелеві сталі 0,002...0,003 [173, 187, 188]; сталі 0,25; нержавіючі сталі 0,01 [171, 189]; нержавіючі сталі $\leq 1 \cdot 10^{-4}$ (за температури 50°C) [181 – 186].

Такий значний розкид значень швидкості корозії, отриманий різними авторами, обумовлено, скоріш за все, різницею в умовах проведення експериментальних досліджень, до яких можуть відноситися: якість очищення модельної рідини, присутність в ній різноманітних стабілізуючих домішок, якість обробки та очищення конструкційного матеріалу сіток, відносні похибки визначення питомих параметрів, тощо. Виходячи з цього, було проведено дослідження з визначення швидкості корозії основного конструкційного матеріалу СРФ – сталевих сіток саржевого типу

переплетіння, та її впливу на структурні та геометричні характеристики сіток в залежності від терміну їх експлуатації у хімічно агресивних КП (АТ та НДМГ) і під їх парами.

2.2 Конструкція та основний конструкційний матеріал сітчастих розділювачів фаз

Дослідження проводилися на СРФ капілярних ЗЗС палива, що входять до складу паливних баків РРБ РН «Дніпро» і забезпечують необхідну суцільність КП на вході до РУ [205, 206]. До свого використання у складі РРБ РН «Дніпро» паливні баки протягом тривалого часу перебували під дією хімічно агресивних КП (АТ та НДМГ) та їх парів.

Розташування капілярних ЗЗС палива у паливних баках РРБ РН «Дніпро» та фото їх конструктивного виконання наведено на Рис. 2.2. При цьому, слід зазначити, що паливні баки окислювача (АТ) та пального (НДМГ) мають ідентичне конструктивне виконання. Конструктивна схема розташування сіток СРФ капілярних ЗЗС палива в баках АТ та НДМГ РРБ РН «Дніпро» наведено на Рис. 2.3.

СРФ являють собою сітки саржевого типу переплетення з квадратними чарунками у світлі, які закріплені у металевій окантовці. Схематичне зображення саржевого типу переплетення дротяної тканини з квадратними чарунками у світлі наведено на Рис. 2.4.

Для забезпечення запуску РУ РРБ РН «Дніпро» в умовах невагомості застосовують два СРФ, які являють собою сітки, що обмежують зверху та знизу накопичувач капілярного ЗЗС палива: АТ / НДМГ СРФ 1 та 2 (Рис. 2.3). СРФ виготовлені з сіток №008 ТУ-14-4-507-74 (марка сталі 12Х18Н10Т), з розміром чарунки у світлі 80 x 80 мкм і номінальним діаметром дроту 55 мкм.

Для зменшення залишків КП, що не можуть бути використані через порушення суцільності на вході до РУ, до складу забірною пристрою капілярного ЗЗС палива входить СРФ, якій складається з пакету сіток: АТ / НДМГ СРФ 3 (Рис. 2.3). Пакет виготовлено з сіток: №008 ТУ-14-4-507-74

(марка сталі 12Х18Н10Т) і №08¹⁾ (марка сталі 12Х18Н10Т), з розміром чарунки у світлі 800 х 800 мкм і номінальним діаметром дроту 250 мкм.

Примітка: 1) – У АТ / НДМГ СРФ 3 (Рис. 2.3), що входить до складу забірною пристрою капілярного ЗЗС палива, сітка №08 виконує роль підсилювача міцності сітки №008 та запобігає її проплескуванню, тому визначальною для питомого значення КУЗ є сітка №008.

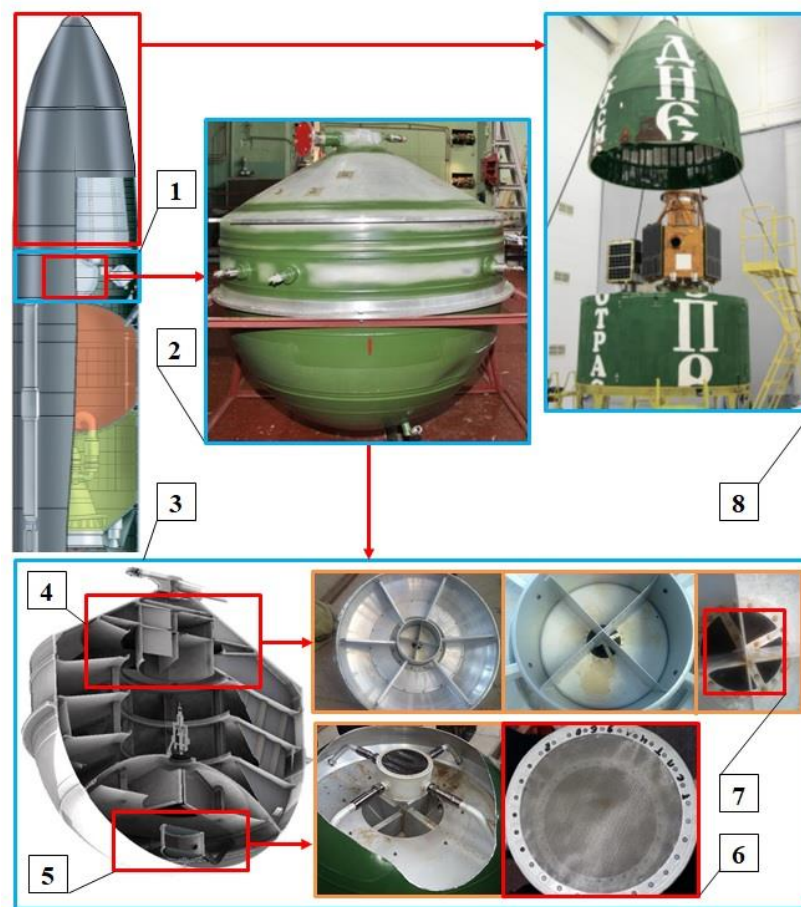


Рис. 2.2. Розташування СРФ капілярних ЗЗС палива у паливних баках РРБ РН «Дніпро» та їх конструктивне виконання: 1 – РРБ; 2 – паливний бак; 3 – конструктивний вигляд внутрішньобакових пристроїв; 4 – забірний пристрій капілярного ЗЗС палива; 5 – накопичувач капілярного ЗЗС палива; 6 – СРФ накопичувача; 7 – СРФ забірною пристрою; 8 – головний блок

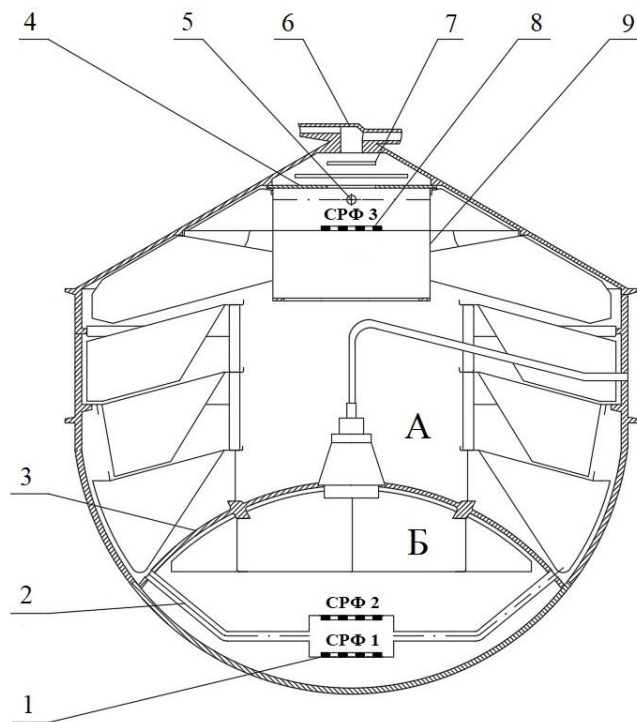


Рис. 2.3. Конструктивна схема капілярних ЗЗС палива баків АТ та НДМГ РРБ РН «Дніпро»: 1 – накопичувач капілярного ЗЗС палива; 2 – трубопроводи; 3 – проміжне днище; 4 – пластина; 5 – отвори; 6 – витратна магістраль; 7 – забірний пристрій капілярного ЗЗС палива; 8 – СРФ забірною пристрою; 9 – тарель забірною пристрою; А – основна порожнина бака; В – проміжна порожнина бака; СРФ 1, 2 – сітка №008; СРФ 3 – пакет сіток №008 і №08

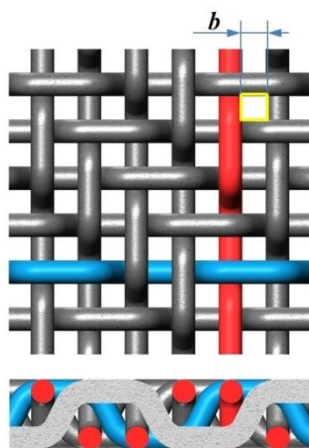


Рис. 2.4. Схематичне зображення саржевого переплетення дротяної тканини з квадратними чарунками у світлі: b – розмір чарунки у світлі

Слід відзначити, що СРФ 1 і 2 знаходились в КП, а СРФ 3 – в парах КП.

Предметом дослідження був основний конструкційний матеріал СРФ капілярних ЗЗС палива – сталеві сітки саржевого типу переплетіння, що забезпечують запуск РУ РРБ РН «Дніпро» в умовах невагомості та зменшують залишки КП, що не випрацьовуються, які тривалий термін знаходились під впливом хімічно агресивних КП (АТ та НДМГ) і їх парів.

Для підтвердження відповідності хімічного складу КП, що тривалий термін знаходився в паливних баках РРБ вимогам стандарту та його кондиційності, було проведено хімічний аналіз проб АТ та НДМГ, злитих із паливних систем РРБ.

Результати хімічного аналізу проб КП АТ та НДМГ, злитих із паливних систем РРБ, після тривалої експлуатації, які наведені у Таблицях 2.1 та 2.2 показали, що вони практично не змінили своїх показників порівняно з вихідними значеннями, наведеними у стандартах.

Таблиця 2.1

Результати аналізу проб АТ злитого із паливних систем РРБ РН «Дніпро»

Параметр		Проце- дура	Масова доля основної речовини / Норма згідно стандарту, %	Масова доля технологічних домішків / Норма згідно стандарту, %	Масова доля меха- нічних домішків / Норма згідно стандарту, %
Номер за порядком та термін експлуатації					
№1	---	заправка	99,53 / $\geq 99,0$	0,47 / $\leq 1,0$	---
		злив	99,52 / $\geq 99,0$	0,48 / $\leq 1,0$	
№2	---	заправка	99,60 / $\geq 99,0$	0,40 / $\leq 1,0$	0,0006 / $\leq 0,002$
		злив	99,70 / $\geq 99,0$	0,30 / $\leq 1,0$	0,0003 / $\leq 0,002$
№3	---	заправка	99,66 / $\geq 99,0$	0,34 / $\leq 1,0$	0,0007 / $\leq 0,002$
		злив	99,65 / $\geq 99,0$	0,35 / $\leq 1,0$	0,0007 / $\leq 0,002$
№4	15 років 2 місяці	заправка	---	---	---
		злив	99,24 / $\geq 99,0$	0,26 / $\leq 1,0$	0,0006 / $\leq 0,002$
№5	15 років 2 місяці	заправка	---	---	---
		злив	99,44 / $\geq 99,0$	0,56 / $\leq 1,0$	0,0006 / $\leq 0,002$
№6	16 років 2 місяці	заправка	99,67 / $\geq 99,0$	0,33 / $\leq 1,0$	0,0006 / $\leq 0,002$
		злив	99,69 / $\geq 99,0$	0,31 / $\leq 1,0$	0,0003 / $\leq 0,002$
№7	16 років 5 місяці	заправка	99,67 / $\geq 99,0$	0,33 / $\leq 1,0$	0,0006 / $\leq 0,002$
		злив	99,70 / $\geq 99,0$	0,30 / $\leq 1,0$	0,0006 / $\leq 0,002$

Після нейтралізації проводився розтин паливних баків АТ та НДМГ і демонтаж СРФ капілярних ЗЗС палива. З кожного паливного бака вилучалося по три СРФ, що знаходилися в різних частинах бака, як у рідкої фазі

компонентів палива, так і під його парами. Процес нейтралізації виключав додатковий вплив на СФР. В ході вилучення СРФ були виконані вимоги щодо виключення потрапляння на сітки механічних забруднень.

У Таблиці 2.3 наведено результати дефектації СРФ капілярних ЗЗС палива (за номерами комплектів зразків (КЗ)), що тривалий термін знаходились під впливом хімічно агресивних КП (АТ та НДМГ) і їх парів.

Таблиця 2.2

Результати аналізу проб НДМГ злитого із паливних систем РРБ РН «Дніпро»

Параметр		Проце- дура	Масо-ва доля основ- ної речо- вини / Норма згідно стандарту, %	Масо-ва доля води / Норма згідно стандарту, %	Масова доля заліза / Норма згідно станда- рту, %	Масова доля меха- нічних доміш-ків / Норма згідно станда- рту, %	Густина / Норма згідно стандарту, г/см ³	Колір / Норма згідно стан- дарту
Номер РРБ за поряд- ком та термін експлуатації								
№1	---	заправка	99,37 / ≥ 99,6	0,14 / ≤ 0,35	---	відсутня / ≤ 0,001	---	---
		злив	99,32 / ≥ 99,6	0,28 / ≤ 0,35	0,000016 / ≤ 0,0001	відсутня / ≤ 0,001	0,791 / (0,790-0,795)	безбарв./ безбарв.
№2	---	заправка	99,52 / ≥ 99,6	0,09 / ≤ 0,35	0,000016 / ≤ 0,0001	0,0005 / ≤ 0,001	0,791 / (0,790-0,795)	безбарв./ безбарв.
		злив	---	---	0,000026 / ≤ 0,0001	---	0,790 / (0,790-0,795)	безбарв./ безбарв.
№3	---	заправка	---	---	---	---	---	---
		злив	99,10 / ≥ 99,6	0,17 / ≤ 0,35	0,000025 / ≤ 0,0001	0,0005 / ≤ 0,001	0,791 / (0,790-0,795)	безбарв./ безбарв.
№4	15 років 2 місяці	заправка	---	---	---	---	---	---
		злив	99,30 / ≥ 99,6	0,24 / ≤ 0,35	0,000052 / ≤ 0,0001	0,0007 / ≤ 0,001	0,793 / (0,790-0,795)	безбарв./ безбарв.
№5	15 років 2 місяці	заправка	---	---	---	---	---	---
		злив	99,31 / ≥ 99,6	0,18 / ≤ 0,35	0,000040 / ≤ 0,0001	0,0008 / ≤ 0,001	0,791 / (0,790-0,795)	безбарв./ безбарв.
№6	16 років 2 місяці	заправка	99,30 / ≥ 99,6	0,12 / ≤ 0,35	0,000011 / ≤ 0,0001	0,0004 / ≤ 0,001	0,791 / (0,790-0,795)	безбарв./ безбарв.
		злив	---	0,14 / ≤ 0,35	0,000021 / ≤ 0,0001	---	0,790 / (0,790-0,795)	безбарв./ безбарв.
№7	16 років 5 місяці	заправка	---	---	---	---	---	---
		злив	99,28 / ≥ 99,6	0,16 / ≤ 0,35	0,000023 / ≤ 0,0001	---	0,791 / (0,790-0,795)	безбарв./ безбарв.

Таблиця 2.3

Результати дефектації СРФ капілярних ЗЗС палива, що тривалий термін перебували під впливом хімічно агресивних КП (АТ та НДМГ) і їх парів

Номер комплекту зразків.	СРФ	Термін знаходження сіток в рідкій фазі КП та під його парами		Результати візуального огляду сіток
№ 8	АТ СРФ 1	рідка фаза	14 років	Зафіксовано: сітка має темно сірий тьмянний колір (аналогічно іншим деталям зі сталі 12Х18Н10Т); пляму неправильної форми розміром 50% площі сітки; межі плями не торкались меж сітки; на внутрішньої стороні сітки мається деяка кількість крупинок з розмірами $\leq 0,5$ мм; наявність плоскої каплі неметалевої речовини темно-коричневого кольору, майже правильної круглої форми розміром 8 – 10 мм. За допомогою інструментального мікроскопу з ціною ділення вимірювальної шкали 0,005 мм було виявлено, що в окремих чарунках сітки мались рижуваті пластівці, які не перевищували за розміром одичної чарунки; також зустрічались частки з металевим блиском, розміром у 2 – 3 чарунки.
	АТ СРФ 2			Зафіксовано: сітка має темно сірий тьмянний колір; наявність плоскої каплі неметалевої речовини темно-коричневого кольору, майже правильної круглої форми розміром 10 – 12 мм.
	АТ СРФ 3	пари		Зафіксовано: сітка №008 брудна, має чорно-коричневий колір; по периметру вікон СРФ мається смуга нашарування коричневого кольору шириною 5 – 12 мм, від якої з зазором 3 – 5 мм була овальна пляма завширшки 2 - 3 мм; у місцях з нашаруванням чарунки сітки були забиті речовиною нашарування на 20 – 40 % від його площі; на окантовці сітки та її основі були наявні світло-коричневі плями, що розповсюджувалися від межі сітки.
	НДМГ СРФ 1	рідка фаза		Зафіксовано: сітка блискуча, світло-сірого кольору з легким жовтуватим відтінком; наявність плями у вигляді смуги шириною 10 – 15 мм, що знаходилось на межі сітки довжиною $\frac{1}{4}$ кола.
	НДМГ СРФ 2			Зафіксовано: сітка блискуча, світло-сірого кольору з легким жовтуватим відтінком.
	НДМГ СРФ 3	пари		Зафіксовано: сітка №008 чиста, блискуча, сріблястого кольору.
	№ 9	АТ СРФ 1		рідка фаза
АТ СРФ 2		Зафіксовано: сітка темно-коричневого коричневого, вкрита суцільним шаром солей, механічні пошкодження відсутні.		
АТ СРФ 3		пари	Зафіксовано: сітка №008 темно-коричневого кольору, тьмяна, матова; в окремих чарунках маються пластівці, що не перевищують за розміром окремої чарунки; механічні пошкодження відсутні.	
НДМГ СРФ 1		рідка фаза		
НДМГ СРФ 2				
НДМГ СРФ 3	пари	Зафіксовано: сітка №008 чиста, блискуча, сріблястого кольору, механічні пошкодження відсутні.		

№ 10	АТ СРФ 1	рідка фаза	15 років 2 місяці	Зафіксовано: сітки темно-рижого кольору, мається білий наліт; на обох сітках було присутня по одній плоскій краплі неметалевої речовини темно-коричневого кольору, на відстані 10 мм від окантовки. На сітці №1 малась вм'ятина глибиною 1 мм, довжиною 10 мм.	
	АТ СРФ 2				
	АТ СРФ 3	пари			Зафіксовано: сітка №008 брудна, темно-коричневого кольору; дроти сітки вкриті нальотом; біля окантовки у деяких місцях був присутній наліт білого кольору, на окантовці пляма сірого та білого кольору.
	НДМГ СРФ 1	рідка фаза			Зафіксовано: сітки рудого кольору зі слабо коричневою плямою у центрі; присутній наліт білих солей. На сітці №1 малась вм'ятина глибиною 1 мм, довжиною 10 мм.
	НДМГ СРФ 2				
	НДМГ СРФ 3	пари			Зафіксовано: сітка №008 чиста, блискуча, сріблястого кольору, механічні пошкодження відсутні.
№ 11	АТ СРФ 1	рідка фаза	15 років 2 місяці	Зафіксовано: сітки чисті, сірого кольору; на обох сітках мається темні крапки діаметром 2 мм.	
	АТ СРФ 2				
	АТ СРФ 3	пари			Зафіксовано: сітка №008 брудна, має наліт рижого кольору.
	НДМГ СРФ 1	рідка фаза			Зафіксовано: обидві сітки сірого кольору з неясковою плямою у центрі діаметром 20 мм.
	НДМГ СРФ 2				
	НДМГ СРФ 3	пари			Зафіксовано: сітка №008 чиста, блискуча, сріблястого кольору, механічні пошкодження відсутні.
№ 12.	АТ СРФ 1	рідка фаза	17 років 5 місяців	Зафіксовано: обидві сітки чорного кольору; у центрі мають по одній плямі порошкоподібного нальоту коричневого кольору; механічні пошкодження відсутні.	
	АТ СРФ 2				
	АТ СРФ 3	пари			Зафіксовано: сітка №008 має темно-сірий колір, тьмяна.
	НДМГ СРФ 1	рідка фаза			Зафіксовано: дроти сіток світлі, блискучі; в чарунках сіток відсутні забруднення; механічні пошкодження відсутні. На сітці №1 малась пляма синьо-зеленого кольору, що займала 1/5 площі сітки.
	НДМГ СРФ 2				
	НДМГ СРФ 3	пари			Зафіксовано: дроти сітки №008 світлі, блискучі; в чарунках сітки відсутні забруднення; на всій поверхні сітки присутні плями синьо-зеленого кольору; механічні пошкодження відсутні.
№ 13.	АТ СРФ 1	рідка фаза	20 років	Зафіксовано: сітка темна, блискуча з темно-коричневою смугою розташованою за радіусом; на сітці рівномірно розташовані чорні плями діаметром від 2 до 4 мм; окремі чарунки сітки забруднені; механічні пошкодження відсутні.	
	АТ СРФ 2				
	АТ СРФ 3	пари			Зафіксовано: сітка №008 чорна; механічні пошкодження відсутні.
	НДМГ СРФ 1	рідка фаза			Зафіксовано: сітка світла, блискуча; маються плями коричневого кольору: одна у центрі, дві у окантовки; в межах плям окремі чарунки сітки забруднені; механічні пошкодження відсутні.
	НДМГ СРФ 2				
	НДМГ СРФ 3	пари			Зафіксовано: сітка світла, блискуча; маються плями сірого кольору розміром 2 – 3 мм; в межах плям окремі чарунки сітки забруднені; механічні пошкодження відсутні.
			Зафіксовано: сітка №008 світла, чиста, блискуча; механічні пошкодження відсутні.		

№ 14	АТ СРФ 1	рідка фаза	20 років 10 місяців		Зафіксовано: сітки тусклі, темного кольору; на сітках, в незначній кількості, присутній коричневий порошок та плями фіолетового кольору; окремі дроти сітки світлі та блискучі; механічні пошкодження відсутні.
	АТ СРФ 2				Зафіксовано: сітка №008 темна, тьмяна; дуже забруднена порошкоподібним нальотом; в чарунках порошок коричневого кольору по всій площі сітки; чарунки повздож окантовки та хрестовини забруднені порошком білого кольору; на поверхні сітки присутня щільна пляма розміром 5x5 мм, яка складається з порошоків білого та коричневого кольорів; механічні пошкодження відсутні.
	АТ СРФ 3	пари			Зафіксовано: сітка чиста, блискуча; у центрі присутня пляма світло-коричневого кольору; механічні пошкодження відсутні.
	НДМГ СРФ 1	рідка фаза			Зафіксовано: сітка світла, чиста, блискуча; подекуди присутні розводи світло-коричневого кольору; у центральних чарунках присутня прозора рідина у вигляді круглої плями діаметром 10мм; механічні пошкодження відсутні.
	НДМГ СРФ 2				Зафіксовано: сітка №008 світла, чиста, блискуча; механічні пошкодження відсутні.
	НДМГ СРФ 3	пари			
№ 15	АТ СРФ 1	рідка фаза	23 роки		Зафіксовано: сітки №008 світлі, чисті, блискучі; механічні пошкодження відсутні.
	АТ СРФ 2				Зафіксовано: сітка темно-сірого кольору; чарунки чисті; по всій площі сітки присутні плями світло-синього кольору, дві плями рижого кольору діаметром 3 мм и 14 мм та чорна пляма діаметром 18 мм; механічні пошкодження відсутні.
	АТ СРФ 3	пари			Зафіксовано: сітка чорного кольору; чарунки чисті; механічні пошкодження відсутні.
	НДМГ СРФ 1	рідка фаза			Зафіксовано: сітка №008 чорного кольору; місцями чарунки засмічені порошкоподібним нальотом білого та коричневого кольору; механічні пошкодження відсутні.
	НДМГ СРФ 2				
	НДМГ СРФ 3	пари			
№ 16.	АТ СРФ 1	рідка фаза	31 рік 1 місяць		Зафіксовано: сітки на поверхні мокрі, чорного кольору; на їх поверхні присутній порошкоподібний наліт коричневого кольору; у світлі чарунки сіток чисті; механічні пошкодження відсутні.
	АТ СРФ 2				Зафіксовано: сітка №008 чорного кольору; на поверхні присутній порошкоподібний наліт коричневого кольору; у світлі чарунки сітки чисті; механічні пошкодження відсутні.
	АТ СРФ 3	пари			Зафіксовано: сітка світло-коричневого кольору, блискуча, чиста; по центру присутні три плями коричневого кольору діаметром до 8 мм; по периметру окантовки на ширині 5 мм сітка має природній колір; у світлі чарунки сіток чисті; механічні пошкодження відсутні.
	НДМГ СРФ 1	рідка фаза			Зафіксовано: сітка світла, блискуча, чиста; по центру присутня пляма світло-коричневого кольору діаметром 10 мм; у світлі чарунки сіток чисті; механічні пошкодження відсутні.
	НДМГ СРФ 2				Зафіксовано: сітка №008 світла, блискуча, чиста; у світлі чарунки сіток чисті; механічні пошкодження відсутні.
	НДМГ СРФ 3	пари			

В подальшому дослідження проводились у наступному порядку:

1. Аналіз хімічного складу речовин, що знаходяться на поверхні зразків сіток СРФ.
2. Аналіз впливу різноманітних факторів на швидкість корозії.

3. Проведення металографічних досліджень зразків сіток СРФ на наявність корозії.

4. Вимірювання геометричних розмірів зразків сіток СРФ оптичним методом.

Роботи за пунктом 4 спочатку проводилися на нових сітках №008, щоб отримати еталонні дані для існуючих умов випробувань, дослідних конструкцій і робочих рідин.

2.3 Аналіз хімічного складу речовин, що знаходяться на поверхні зразків сіток сігчастих розділювачів фаз

За результатами дефектації досліджуваних СРФ капілярних ЗЗС палива було зафіксовано присутність: пластівців, нальоту та різнобарвних плям на поверхні сіток (Таблиця 2.3).

Для визначення складу речовин, виявлених на СРФ, було застосовано методи неруйнівного контролю: рентгено-флуоресцентний; рентгено-структурний; атомно-абсорбційний; потенціометричний; турбодиметричний; інфрачервона спектроскопія; хромато-мас-спектрометрія [205, 206].

Аналізувалися сітки з баків АТ та НДМГ, що входять до складу СРФ 1, 2 і 3 комплекту зразків № 8.

Результати візуального огляду СРФ наведено у Таблиці 2.3.

Рентгено-флуоресцентний аналіз проводили на приладі «СПЕКТРОСКАН», рентгеноструктурний аналіз здійснювали за допомогою рентгенівського дефрактометра «ДРОН-3». Для рентгено-флуоресцентного та рентгеноструктурного аналізів використовували порошок, який отримували при знятті відкладень з сітки механічним шляхом.

Кількісний елементний склад відкладень визначали атомно-абсорбційним методом, який проводили на спектрометрах «HitachiZ9000» та «ShimadzuAA-6800» з використанням у якості об'єкту досліджень азотнокислих розчинів вказаного раніше порошку. Аналіз на аніоди проводили з використанням потенціометричного та турбодиметричного методів.

Для уточнення складу речовини використовувався метод інфрачервоної спектроскопії і обладнання «Shimadzu FTIR 8400» та «Shimadzu FTIR 8300».

З метою виявлення на СРФ, що знаходилися під впливом рідкої та парової фази НДМГ органічних сполук проведено дослідження екстрактів, що були вилучені з сіток за допомогою хлористого метилену, хромато-мас-спектрометричним методом (обладнання – хромато-мас-спектрометр GCHP5890-MSD HP 5972).

Також, було застосовано: іонометр I-120 та фотоелектроколориметр КФК-2.

2.3.1. Результати аналізу хімічного складу речовин, що знаходяться на поверхні зразків сіток сітчастих розділювачів фаз, вилучених з баку окислювача

СРФ, що досліджувалася: темно-коричневого кольору, тьмяні, матові. В окремих чарунках маються частки (пластівці), що не перевищують за розміром окремої чарунки; механічні пошкодження відсутні.

Методом рентгено-структурного аналізу встановлено, що досліджувана речовина (відкладення) не має кристалічної структури, що сформувалася – є аморфною.

Рентгено-флуоресцентний аналіз речовини (порошку), відібраного механічним способом безпосередньо з сітки, показав наявність у досліджуваних пробах марганцю, заліза, нікелю, ніобію та хрому. Інших елементів, починаючи від кальцію та закінчуючи ураном, на рівні 0,1% мас. та вище не виявлено.

Потенціометричний та турбодиметричний аналізи водної витяжки після висушування, показали у відкладенні 3,1% мас. нітратів та 0,1% мас. хлоридів.

При дослідженні методом інфрачервоної спектроскопії в пробах, що аналізуються, підтверджено присутність нітратів, а також встановлено наявність оксидів і води. Отримані спектри близькі до еталонного спектру сполуки типу $Me (NO_3)_m \cdot nH_2O$ (Рис. 2.5 і 2.6), тобто гідратовані нітрати металів, де Me : Al , Fe , Cr , Ni та інших.

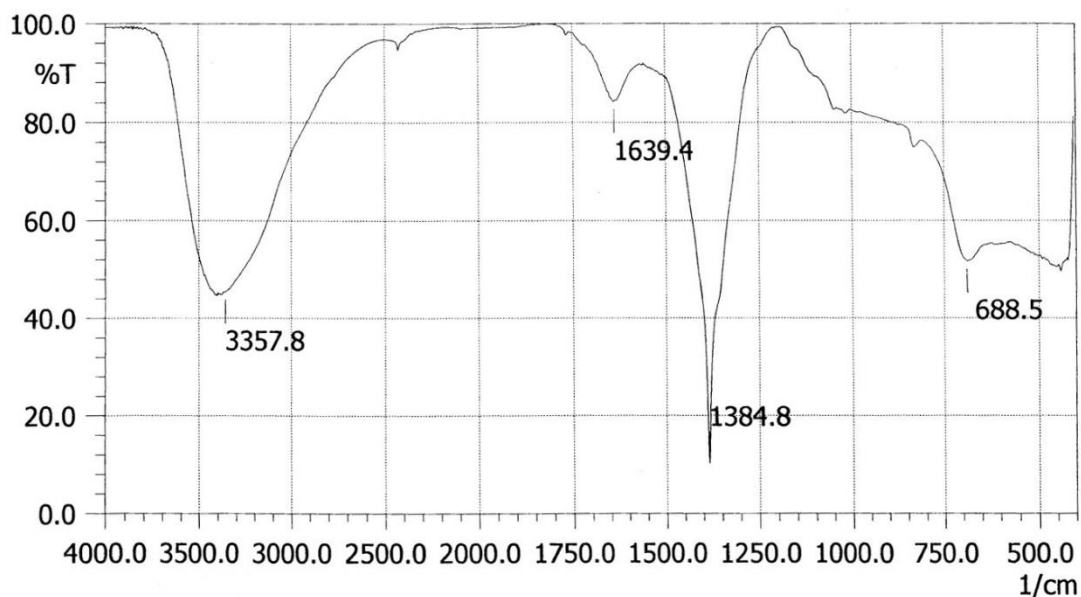


Рис. 2.5. Інфрачервона спектроскопія зразка сітки №008 СРФ 3
(інфрачервоний спектрометр «ShimadzuFTIR 8300»)

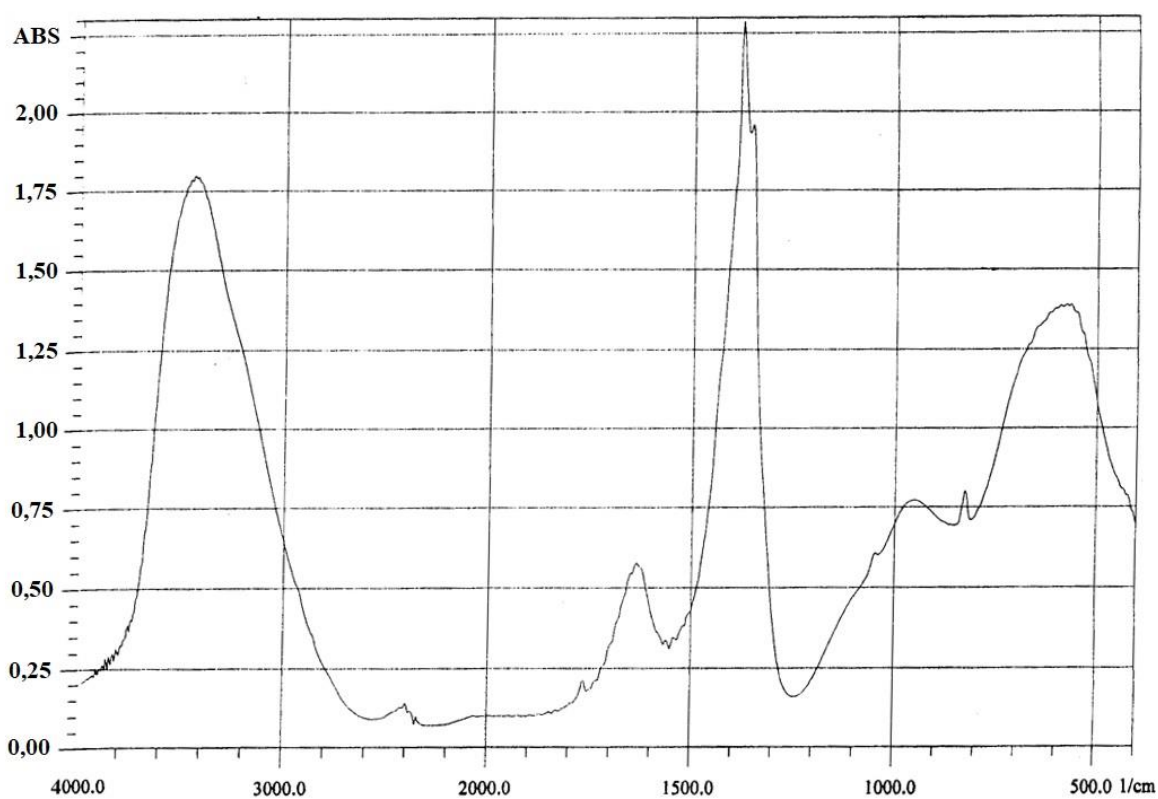


Рис. 2.6. Інфрачервона спектроскопія зразка сітки №008 СРФ 3
(інфрачервоний спектрометр «ShimadzuFTIR 8400»)

Результати атомно-абсорбційного аналізу наведено в Таблиці 2.4 [205, 206].

Таблиця 2.4

Результати атомно-абсорбційного аналізу

Елемент	Масова частка, %
<i>Al</i>	12,000
<i>Fe</i>	4,000
<i>Cr</i>	0,390
<i>Ni</i>	0,320
<i>Mn</i>	0,093
<i>Si</i>	<0,030
<i>Nb</i>	<1,000

Таким чином, результати досліджень показали, що відкладення, наявні на сітках бака окислювача, в основному, являють собою гідратовані нітрати металів, головним чином алюмінію та заліза. Крім нітратів у складі відкладень, у невеликих кількостях, були присутні оксиди та хлориди металів [205, 206].

2.3.2. Результати аналізу хімічного складу речовин, що знаходяться на поверхні зразків сіток сітчастих розділювачів фаз, вилучених з баку пального

СРФ, що досліджувалися: чисті, блискучі, сріблястого кольору, механічні пошкодження відсутні.

Результати атомно-абсорбційного аналізу водної витяжки з СРФ, у яких під час огляду зазначено наявність плям, наведено у Таблиці 2.5 [205, 206].

Таблиця 2.5

Результати атомно-абсорбційного аналізу зразків СРФ з бака НДМГ

Елемент	Вміст, мкг/см ²	
	СРФ 3	СРФ 1
<i>Al</i>	0,044	0,011
<i>Fe</i>	0,0052	0,0089
<i>Mn</i>	0,0052	0,0023
<i>Ni</i>	0,0028	0,0030
<i>Cr</i>	0,0024	0,0036

При дослідженні СРФ методом хромато-мас-спектрометрії органічні сполуки не були виявлені.

Таким чином, проведені дослідження показали, що склад катіонів на сітках з баків окислювача та пального практично аналогічний. Виявлені катіони металів відповідають елементам, що входять до складу сплаву алюмінію та сталі – основних конструкційних матеріалів паливної системи, що дефектується. Однак через малу кількість речовини на сітках, які контактували з НДМГ, встановити його склад перерахованими вище методами не було можливим [205, 206].

2.4. Аналіз впливу різноманітних факторів на швидкість корозії

За результатом проведених досліджень було отримано великий масив даних щодо вивчення взаємодії сталі 12X18H10T з ракетними КП АТ і НДМГ [186, 205, 206]. Згідно цих даних визначено, що відносно вказаних КП сталь 12X18H10T має високу корозійну стійкість [186, 205, 206]:

- максимальна швидкість суцільної (рівномірної) корозії не перевищую $\leq 1 \cdot 10^{-3}$ мм на рік за температури 50°C , що характеризує матеріали, як «цілковито стійкі»;

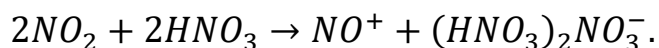
- локальні види корозії (піттингова, міжкристалічна, крапкова, контактна, щілинна, корозійне розтріскування під напругою) відсутні.

АТ (Аміл). У відповідності до вимог стандарту АТ може мати вміст до 1% технологічних домішок у перерахунку на азотну кислоту. АТ, який не має технологічних домішок, як звісно, практично не реагує з металами за звичайної температури, за винятком лужних металів.

Реакційна здатність АТ визначається ступенем його дисоціації з утворенням катіона нітрозонія NO^+ та аніону NO_3^- .

За звичайною температурою та за відсутністю домішок ступінь дисоціації АТ надзвичайно мала. У присутності азотної кислоти ступінь

дисоціації збільшується. У системі існує чергова рівновага, яка змінюється в залежності від температури:



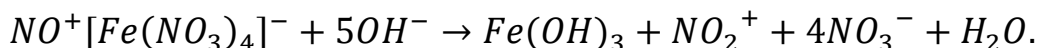
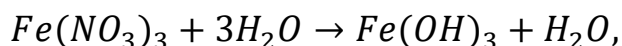
При знижених температурах у розчині утворюється доволі стійке з'єднання $2NO_3 \cdot N_2O_4$.

Присутність азотної кислоти у АТ призводить до підвищення діелектричної проникності (ϵ) відповідно на 0,18 одиниць на 1% введеної добавки при температурі 20⁰С, збільшує електропровідність середовища і, відповідно, впливає на процес протікання корозії і на розчинність нітрокомплексів, що утворюються.

Таким чином, при взаємодії АТ з металами можливо очікувати утворення нітратів металів у вигляді $Me(NO_3)_m \cdot nN_2O_4$ або у вигляді іонного з'єднання $NO^+[Me(NO_3)_m]^-$.

Нітрати, що утворюються стійкі лише у зневодненому середовищу. На повітрі вони, поглинаючи вологу, переходять у кристалогідрати, які мають склад $[Me(NO_3)_m] \cdot nN_2O$, у випадку заліза це кристалогідрати $Fe(NO_3)_3 \cdot 6N_2O$, $Fe(NO_3)_3 \cdot 9N_2O$.

Розчини солей $Fe(+3)$, які містять надмірну кислоту, безбарвні. У воді нітрати заліза розчиняються, та утворюють коричневий розчин. Що обумовлено протіканням гідролізу:



Природа (кристалічні, аморфні) продуктів, що утворюються визначається вмістом вільної рідини. В залежності від хімічних та фізичних властивостей опади можуть бути, як у розчинному вигляді, так і у вигляді суспензії.

Звісно, що розчинність нітратів, що утворюються в АТ залежить від температури: при підвищенні температури вона збільшується, а при зниженні – зменшується. Тому при швидкому охолодженні АТ, за рахунок зменшення розчинності продуктів корозії не виключається можливість їх випадіння у

вигляді опадів, частіше за все на розвинутих поверхнях, наприклад, на сітках СРФ та фільтрів.

Кінетичні криві корозії сталі 12Х18Н10Т в АТ свідчать про утворення на їх поверхні захисних оксидних плівок.

Залежність швидкості корозії від часу описується емпіричним рівнянням:

$$V_{\tau} = (V_0 - V_{ст}) \cdot e^{-a\tau} + V_{ст}, \quad (2.2)$$

де V_{τ} – швидкість корозії в момент часу τ ; V_0 – швидкість корозії у початковий момент часу; $V_{ст}$ – стаціонарна швидкість корозії; a – константа, що емпірично підбирається.

Дослідження протікання корозійних процесів сталі 12Х18Н10Т в АТ виявили, що:

- в початковий період часу формування плівки окису та процес утворення опадів проходять приблизно з однаковими витратами металу;
- втрати у вазі зразків відбуваються переважно у перші терміни впливу АТ на сталь (на протязі першого місяця);
- корозія у початковий період проходить, як з утворенням плівки окису (кольору вороніння), так і з утворенням опадів (азотно-кислих солей);
- при різних умовах досліджень плівка окису утворюється однакової товщини (час її утворення, приблизно 30 тижнів, незважаючи на те, що втрати ваги зразків збільшуються на протязі трьох місяців);
- при надлишку кисню закономірність росту плівки зберігається, таким чином через місяць маємо максимум вагових втрат, які у подальшому не змінюються з протягом часу (на утворення плівки йде від 15 до 40 % металу);
- корозія в газової і рідкої фазі йде з наростанням швидкості на протязі, приблизно, 5...10 тижнів (це період до утворення чорної плівки). У цей період швидкість корозії в газовій фазі більше ніж в рідкій. В газовій фазі утворення плівки йде швидше і тому через 2...10 тижнів плівка стає

достатньо досконалою, і процес корозії починає уповільнюватися сильніше, ніж у рідкій фазі;

- у рідкій фазі дифузія кисню до поверхні ускладнена. Утворення плівки йде повільно, тому швидкість корозії нарощується теж повільно. Пасивація відбувається довше, що можливо пояснити меншою швидкістю дифузії до металу.

Процеси утворення плівок та солей в АТ взаємопов'язані.

Утворення плівки та відмінності в значеннях швидкостей корозії в рідкій і газовій фазі пов'язані з кількістю азотної кислоти в АТ.

При використанні у якості газу наддуву інертного газу (азоту) швидкість корозії сталі 12Х18Н10Т (при зберіганні з залишками АТ, що не зливаються) значно нижча ніж при використанні повітря.

Таким чином, можна підсумувати, що корозія сталі 12Х18Н10Т в АТ і під його парами швидкоплинно протікає тільки у початковий період, в подальшому її швидкість значно уповільнюється.

Без врахування корозії в початковий період, швидкість суцільної (рівномірної) корозії для сталі 12Х18Н10Т за температури 50⁰ С складатиме $\leq 1 \cdot 10^{-4}$ мм на рік. При цьому вона буде збільшуватися зі збільшенням змісту азотної кислоти в АТ [205, 206].

У випадку незначного обводнення (0,02 – 0,04 % масс.) спостерігається значне зниження швидкості корозії.

Також слід відмітити, що сталь 12Х18Н10Т не піддається в АТ локальним видам корозії (піттинової, міжкристалічній, крапковій, контактній, щілинній та корозійному розтріскуванню під напругою) [205, 206].

НДМГ (Гептил). НДМГ є стабільним при герметичному зберіганні під наддувом інертним газом (азотом) і не піддається каталітичному розкладанню під впливом металевих матеріалів.

Результати корозійних досліджень нержавіючої сталі 12Х18Н10Т в широкому діапазоні температур при різноманітних експозиціях свідчать про високу корозійну стійкість вказаних матеріалів в НДМГ.

Без врахування корозії в початковий період, швидкість суцільної (рівномірної) корозії для сталі 12X18H10T при температурі 50 °С складатиме $\leq 1 \cdot 10^{-4}$ мм на рік [205, 206].

Огляд зразків показує, що їх поверхня в порівнянні з еталонними практично не змінилась, зазвичай не відзначалось ані потемніння поверхні, ні наявності нальоту чи опадів.

Сталь 12X18H10T не піддається в НДМГ локальним видам корозії (піттинової, міжкристалічній, крапковій, контактній, щілинній та корозійному розтріскуванню під напругою) [205, 206].

АТ та НДМГ мають низьку корозійну активність по відношенню до нержавіючої сталі 12X18H10T. Присутня у якості технологічної домішки в АТ азотна кислота збільшує швидкість корозії нержавіючої сталі 12X18H10T. Однак при наявності азотної кислоти в АТ у межах норми згідно стандарту, збільшення швидкості корозії сталі 12X18H10T незначне. [205, 206]

Без врахування корозії в початковий період, швидкість суцільної (рівномірної) корозії для сталі 12X18H10T при температурі 50 °С в АТ та НДМГ складатиме $\leq 1 \cdot 10^{-4}$ мм на рік [205, 206].

2.5. Проведення металографічних досліджень зразків сіток сітчастих розділювачів фаз на наявність корозії

Об'єктом досліджень були зразки конструкційних матеріалів сіток СРФ декількох номерів комплектів зразків.

Перелік сіток СРФ, з яких було вирізано зразки для металографічних досліджень та КП, з якими вони контактували у процесі тривалого терміну експлуатації наведено у Таблиці 2.6 [205, 206].

Метою металографічних досліджень було визначення стану конструкційного матеріалу сіток СРФ капілярних ЗЗС палива після їх тривалої експлуатації в хімічно агресивних КП (АТ і НДМГ) та під їх парами.

Перелік сіток СРФ, з яких було вирізано зразки для металографічних досліджень та КП, з якими вони контактували у процесі тривалого терміну експлуатації

Номер комплекту зразків сіток СРФ	КП	Конструкційний матеріал
№9 (15 років знаходження СРФ під впливом КП і їх парів)		
СРФ 2	АТ	12Х18Н10Т
СРФ 2	НДМГ	12Х18Н10Т
№12 (17 років і 5 місяців знаходження СРФ під впливом КП і їх парів)		
СРФ 2	АТ	12Х18Н10Т
СРФ 2	НДМГ	12Х18Н10Т
№13 (20 років знаходження СРФ під впливом КП і їх парів)		
СРФ 2	АТ	12Х18Н10Т
СРФ 3	АТ	12Х18Н10Т
СРФ 2	НДМГ	12Х18Н10Т
СРФ 3	НДМГ	12Х18Н10Т
№14 (20 років і 10 місяців знаходження СРФ під впливом КП і їх парів)		
СРФ 2	АТ	12Х18Н10Т
СРФ 3	АТ	12Х18Н10Т
СРФ 2	НДМГ	12Х18Н10Т
СРФ 3	НДМГ	12Х18Н10Т

Підготовка зразків до дослідження полягала у вирізанні фрагментів конструкційного матеріалу з робочої частини сіток СРФ та їх гарячого запресування у фенольну смолу. Запресування здійснювалась так, щоб дроти сітки (3-4 прошарку) були розташовані перпендикулярно робочій поверхні шліфа.

Підготовку мікрошліфів (полірування та травлення) та мікро-оптичні дослідження проводили згідно вимог металографічного методу оцінки корозійних уражень (ГОСТ 9.908-85).

Дослідження мікрошліфів проводилось на металографічному оптичному мікроскопі «Versamet-2», фірми «Union», якій дозволяє здійснювати безпосереднє візуальне спостереження та фотографування при збільшенні від 5 до 2000 разів.

Мікроструктуру фрагментів сіток зі сталі 12X18H10T виявляли у реактиві до складу якого входило: 100 мл 0,1% HCl + 5 гр. $FeHl_3 \cdot 6H_2O$.

Для вимірів діаметрів дротів сіток СРФ використовували комп'ютерну обробку знімків, які було отримано за допомогою цифрової камери – окуляра. Результати багаторазових вимірів діаметрів дротів сіток СРФ оброблялись згідно ГОСТ 8.207-76 [205, 206].

При візуальному огляді зразків сіток СРФ встановлено:

- затемнення поверхні сіток, що контактували з АТ – темно-сірий колір;
- поверхня сіток, що контактували з НДМГ – світла.

Дослідження поперечних перерізів дротів сіток на фотографіях мікрошліфів (Рис. 2.7 – 2.15) при збільшенні у 400, 1300 і 2000 разів (для зразків сіток СРФ номерів комплектів №9, №12, №13 і №14) виявило, що [205, 206]:

- мікроструктура сталі 12X18H10T у всіх досліджених зразків є аустенітною з розміром зерна аустеніту, що відповідає 9 – 10 балу відповідно ГОСТ 5639-82. Мікроструктура типова для даної марки сталі;

- присутність мікронерівності на поверхні дротів зразків сіток, що контактували, як з АТ, так і з НДМГ;

- на окремих дротах мікронерівності на поверхні дротів виражені сильніше ніж на інших. На поперечних перерізах поверхня таких дротів виглядає більш шорсткою, або укритою виразкою.

Максимальна глибина мікронерівності на поверхні дротів зразків сіток, що було виявлено складає ~ 1 мкм (у сіток з комплекту зразків №14; 20 років і 10 місяців знаходження СРФ під впливом КП і їх парів; Рис. 2.14 і 2.15). При візуальному порівнянні сукупності отриманих зображень можливо зробити висновок, що дроти сіток, які контактували з АТ мають більшу мікронерівність поверхні, і, якщо порівнювати сітки СРФ з баків АТ, то мікронерівність більше у сіток СРФ 3.

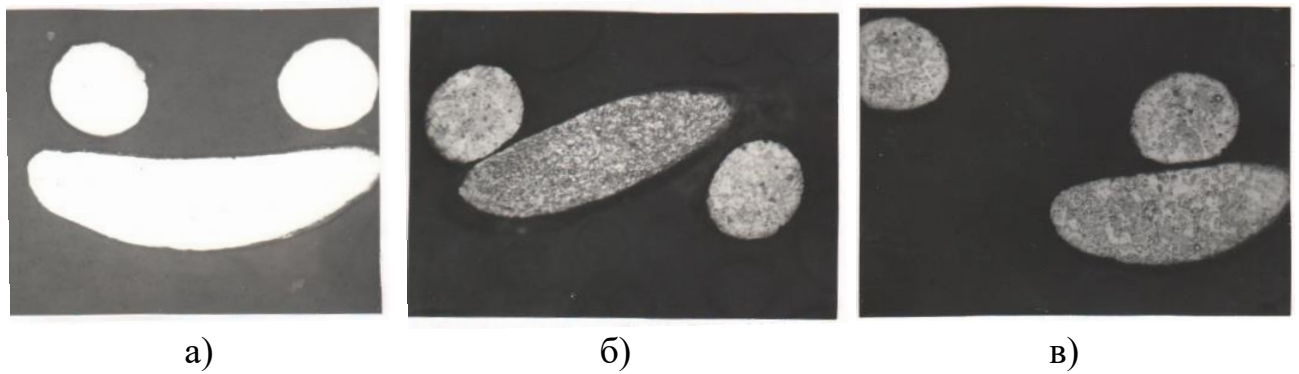


Рис. 2.7. Фотографії нетравлених мікрошліфів і мікроструктури після травлення сталі 12Х18Н10Т, комплекту зразків СРФ №9 (збільшення 400 разів): а) – нетравлений мікрошліф сітки АТ СРФ 2; б) – мікроструктура сітки АТ СРФ 2; в) – мікроструктура сітки НДМГ СРФ 2

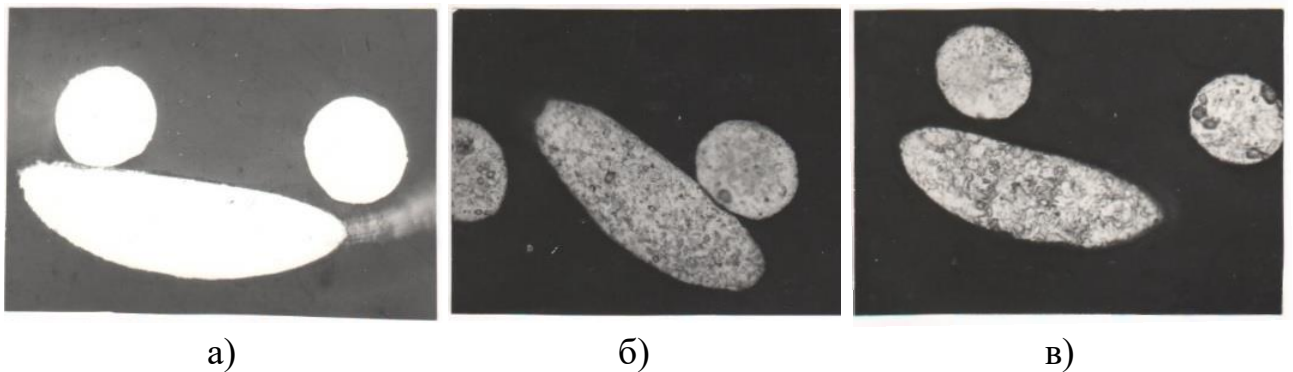


Рис. 2.8. Фотографії нетравлених мікрошліфів і мікроструктури після травлення сталі 12Х18Н10Т, комплекту зразків СРФ №12 (збільшення 400 разів): а) – нетравлений мікрошліф сітки НДМГ СРФ 2; б) – мікроструктура сітки НДМГ СРФ 2; в) – мікроструктура сітки АТ СРФ 2

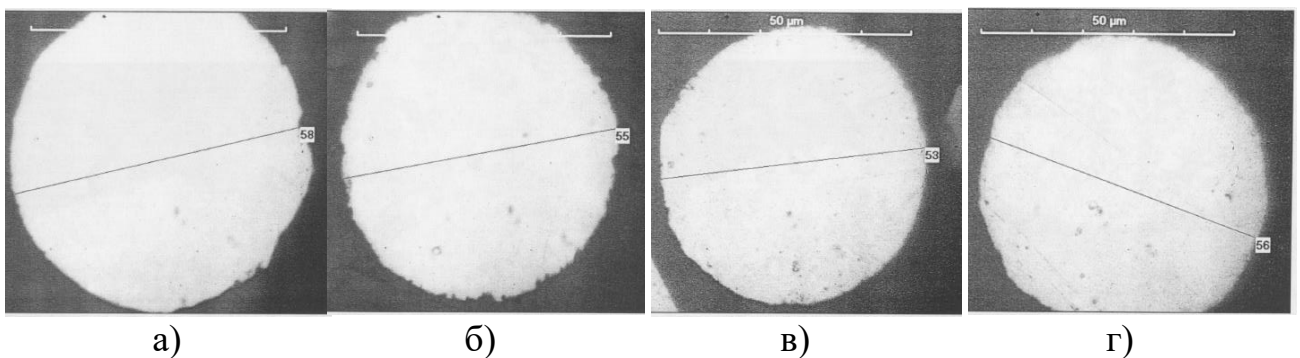


Рис. 2.9. Фотографії нетравлених мікрошліфів сталі 12Х18Н10Т, комплекту зразків СРФ №13 (збільшення 1300 разів): а), б), в) і г) – нетравлений мікрошліф сітки АТ СРФ 2

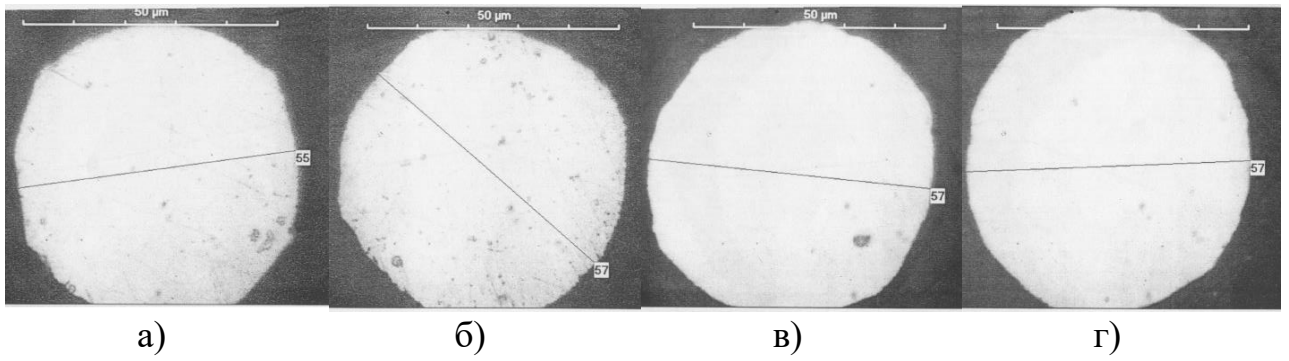


Рис. 2.10. Фотографії нетравлених мікрошліфів сталі 12Х18Н10Т, комплекту зразків СРФ №13 (збільшення 1300 разів): а), б), в) і г) – нетравлений мікрошліф сітки НДМГ СРФ 2

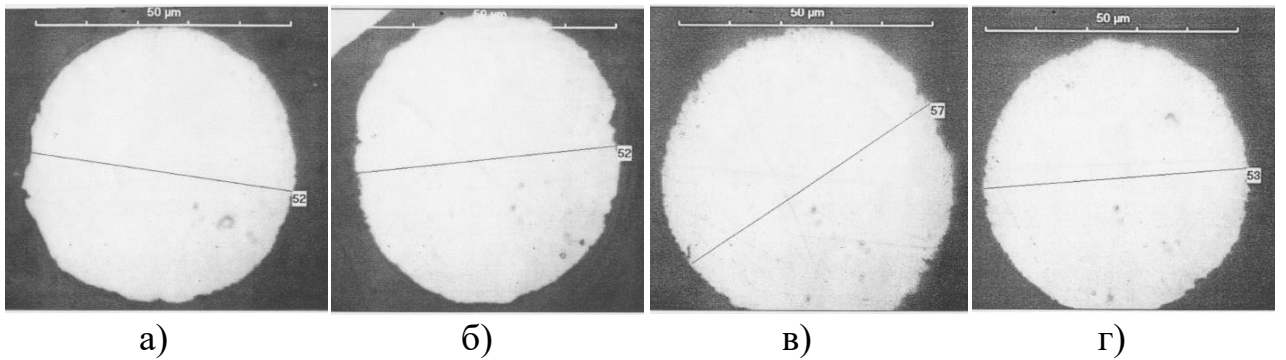


Рис. 2.11. Фотографії нетравлених мікрошліфів сталі 12Х18Н10Т, комплекту зразків СРФ №13 (збільшення 1300 разів): а), б, в) і г) – нетравлений мікрошліф сітки АТ СРФ 3

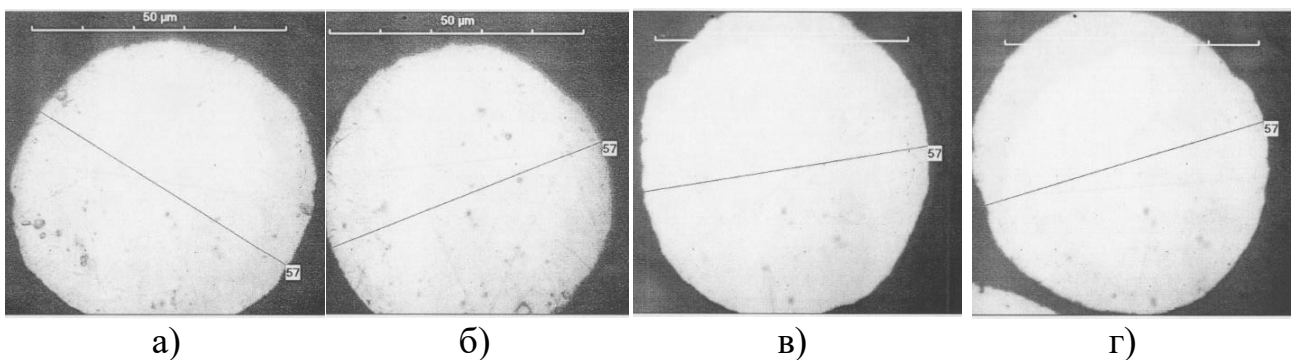
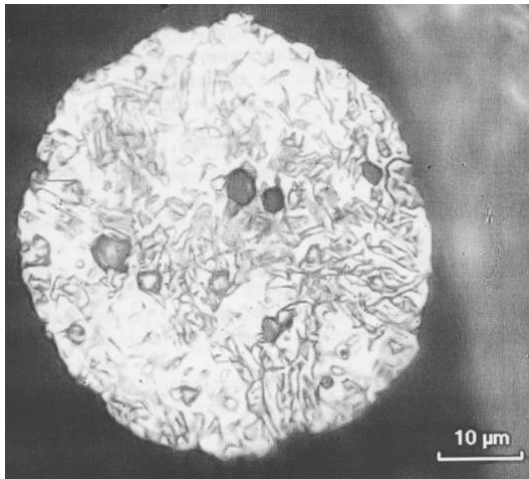
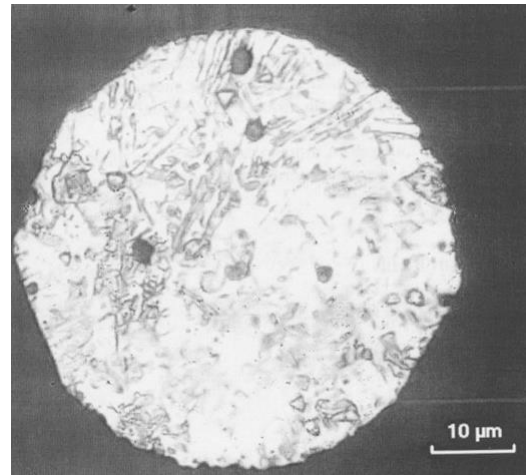


Рис. 2.12. Фотографії нетравлених мікрошліфів сталі 12Х18Н10Т, комплекту зразків СРФ №13 (збільшення 1300 разів): а), б, в) і г) – нетравлений мікрошліф сітки НДМГ СРФ 3

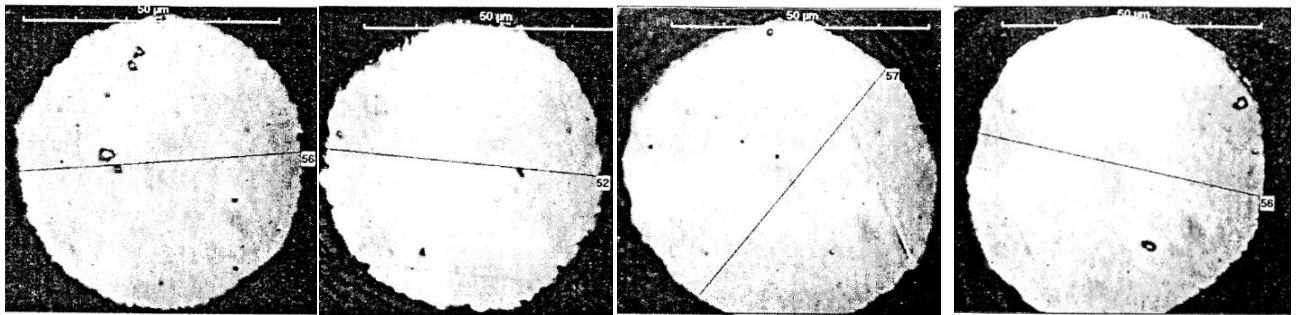


а)



б)

Рис. 2.13. Фотографії мікроструктури після травлення сталі 12Х18Н10Т, комплекту зразків СРФ №13 (збільшення 2000 разів): а) – мікроструктура сітки АТ СРФ 2; б) – мікроструктура сітки НДМГ СРФ 2



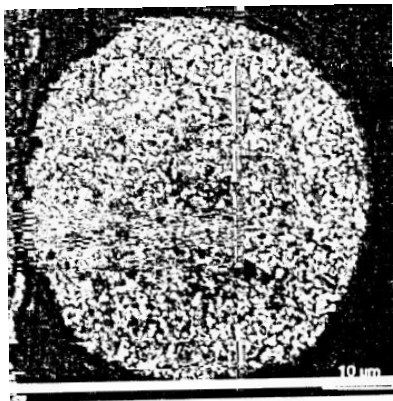
а)

б)

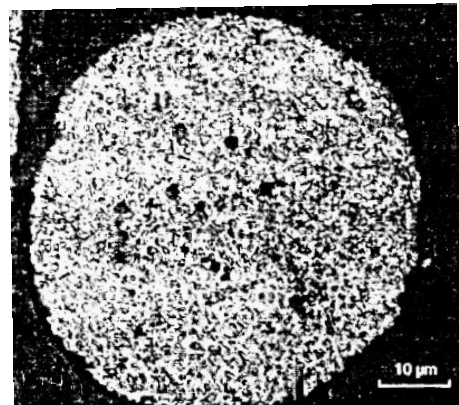
в)

г)

Рис. 2.14. Фотографії нетравлених мікрошліфів сталі 12Х18Н10Т, комплекту зразків СРФ №14 (збільшення 1300 разів): а) – нетравлений мікрошліф сітки АТ СРФ 2; б) – нетравлений мікрошліф сітки АТ СРФ 3; в) – нетравлений мікрошліф сітки НДМГ СРФ 2; г) – нетравлений мікрошліф сітки НДМГ СРФ 3



а)



б)

Рис. 2.15. Фотографії мікроструктури після травлення сталі 12Х18Н10Т, комплекту зразків СРФ №13 (збільшення 2000 разів): а) – мікроструктура сітки АТ СРФ 2; б) – мікроструктура сітки НДМГ СРФ 2

Якщо оцінювати швидкість корозії конструкційного матеріалу сіток СРФ сталі 12Х18Н10Т за максимальною глибиною мікронерівності поверхні дротів, що спостерігається (у комплекту зразків сіток СРФ №14; 20 років і 10 місяців знаходження СРФ під впливом КП і їх парів; Рис. 2.14 і 2.15), то вона складає $\sim 0,48 \cdot 10^{-4}$ мм на рік. Цей результат узгоджується зі швидкістю суцільної (рівномірної) корозії в АТ та НДМГ нержавіючої сталі марки 12Х18Н10Т – $\leq 1 \cdot 10^{-4}$ мм на рік, яка була встановлена гравіметричним методом і відповідає порядку величини, що було визначено більш точним резистометричним методом (згідно даних наведених у розділі 2.4).

Загальний аналіз отриманих результаті металографічних досліджень мікроструктури зразків сталі 12Х18Н10Т сіток СРФ на наявність корозії підтверджує данні викладені у розділі 2.4 і свідчить про наявність суцільного (рівномірного) корозійного враження поверхні дротів сітки.

Згідно ГОСТ 9.908-85 суцільна (рівномірна) корозія визначається за [205, 206]:

1) Показником втрати маси на одиницю площі поверхні Δm , кг/м², за формулою:

$$\Delta m = \frac{m_0 - m_1}{S}, \quad (2.3)$$

де m_0 – маса зразка до випробувань, кг; m_1 – маса зразка після випробувань та видалення продуктів корозії, кг; S – площа поверхні зразка.

2) Зміною розмірів, яку визначають прямими вимірюваннями по різниці між розмірами зразків до і після випробувань та видалення продуктів корозії (Рис. 2.16).

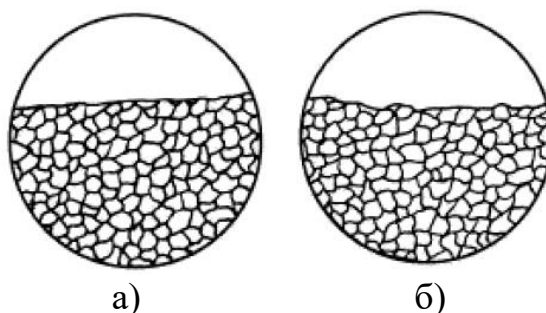


Рис. 2.16. Схема типового вигляду корозійного ураження металу при суцільній (рівномірній) корозії: а) – зразка до випробувань; б) – зразок після випробувань та видалення продуктів корозії

Оскільки оцінити швидкість суцільної (рівномірної) корозії, за показником втрати маси на одиницю площі поверхні (Δm) неможливо через відсутність даних про масу зразка до випробувань (m_0), було виконано вимірювання геометричних розмірів сіток СРФ оптичним методом (див. розділ 2.6), та визначено швидкість суцільної (рівномірної) корозії за допомогою другого методу – зміни розмірів [205, 206].

2.6. Вимірювання геометричних розмірів зразків сіток сітчастих розділювачів фаз оптичним методом

Дослідження наявності та величини корозії дротів сітки №008 демонтованих СРФ виконувалося за допомогою оптичного методу. Для цього використовувався двопозиційний вимірювальний прилад (ДВП-1). Початкові геометричні параметри (розміри) сітки визначалися для еталонних зразків.

Вимірювання діаметрів дротів та розмірів чарунок сітки СРФ проводилися на ділянках, які мають розмір 5x5 мм. У кожній зоні у двох перпендикулярних напрямках виконувались виміри «дріт-чарунка-дріт» по 10 штук кожного елемента (Рис. 2.17, 2.18). За цими даними знаходилися середні значення діаметра дроту та розміру чарунки. Загалом для сіток СРФ 1 і 2 було виконано 180 замірів діаметрів дротів та розмірів чарунок (для кожної). Для сіток СРФ 3 було виконано 400 замірів. Допустима похибка результатів вимірювання склала ± 2 мкм.

Сітки СРФ, що досліджувалися, у відповідності до ТУ 14-4-507-99 повинні були мати наступні характеристики [195, 205, 206, 207]:

- діаметр дроту 55^{+4}_{-3} мкм;
- номінальний розмір чарунки у світлі 80 мкм;
- припустиме відхилення середнього арифметичного розміру чарунки $\pm 13\%$;
- допустиме відхилення розміру окремої чарунки $+75\%$;
- припустиме відхилення розміру особливо великих чарунок 50...70%;
- допустима кількість особливо великих чарунок не більше 9% на сітці з площею 1 м².

Схематичне зображення зон вимірів наведено на Рис. 2.17 та 2.18.

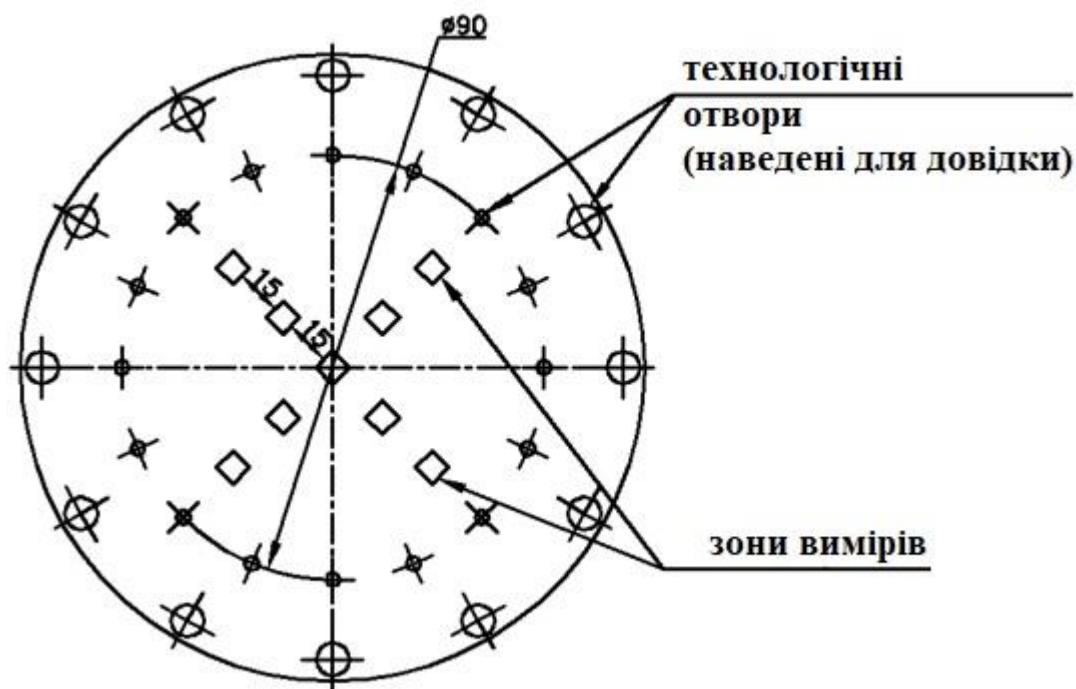


Рис. 2.17. Схема розташування зон вимірів для сіток СРФ 1 і 2 та зразків нових (еталонних) сіток №008

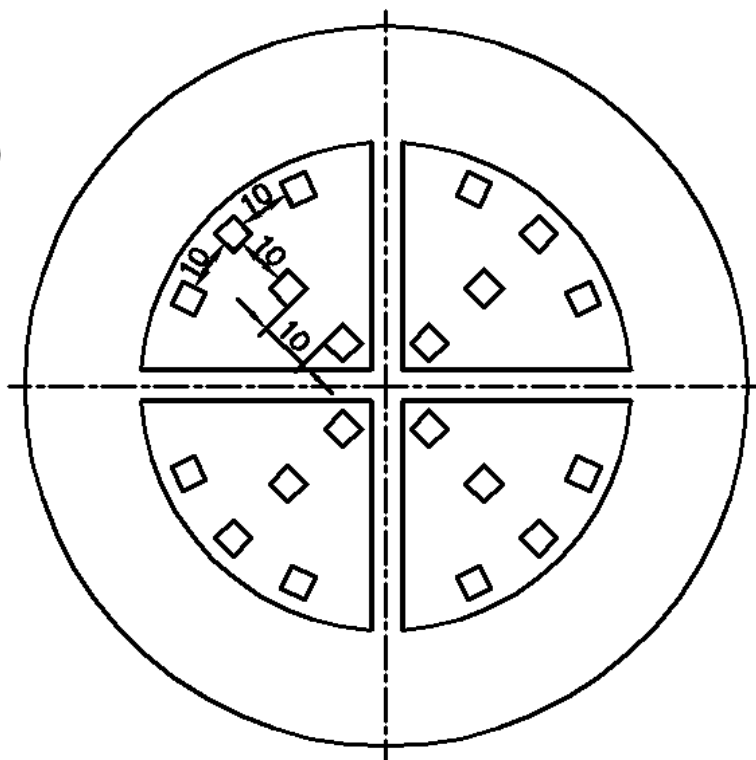





Рис. 2.18. Схема розташування зон вимірів для сіток СРФ 3




За даними вимірів геометричних розмірів сіток СРФ побудовано гістограми, які відображають розподіл кількості вимірних дротів і чарунок

за їх середніми розмірами. Рис. 2.19 і 2.20 для зразків нових (еталонних) сіток №008, та Рис. 1 – 52 для СРФ, що тривалий термін перебували в рідкій фазі КП (АТ і НДМГ) і під їх парами, які наведені у додатку Б.

На Рис. 2.19, 2.20 та 1 – 52 додатку Б для графіків а):

-  – синьою товстою смугою зображена гістограма визначених діаметрів дротів;
-  – червоною переривчатою смугою зображені межі допустимих відхилень діаметрів дротів від номіналу за ТУ;
-  – зеленою смугою зображена крива нормального закону розподілу значень діаметрів дротів.

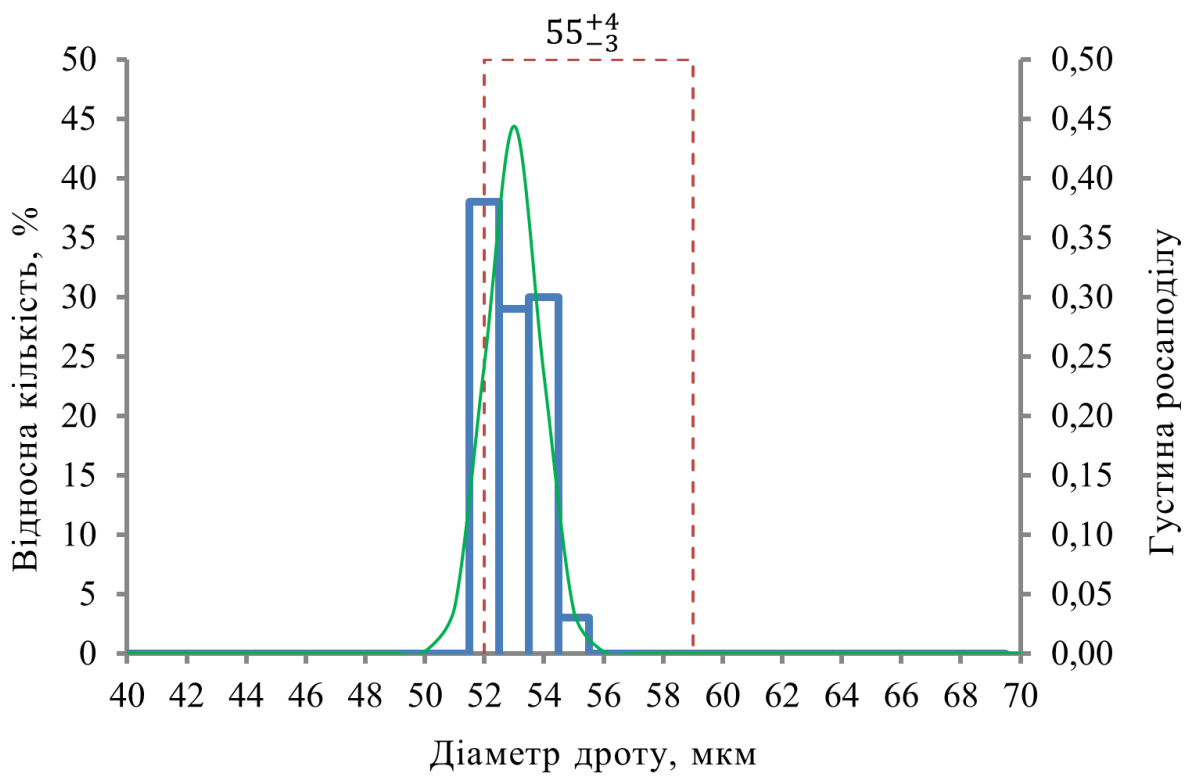
На Рис. 2.19, 2.20 та 1 – 52 додатку Б для графіків б):

-  – синьою товстою смугою зображена гістограма визначених розмірів чарунок сітки;
-  – червоною переривчатою смугою зображені межі допустимих відхилень середньо арифметичного розміру чарунок за ТУ;
-  – зеленою смугою зображена крива нормального закону розподілу значень розмірів чарунок сітки.

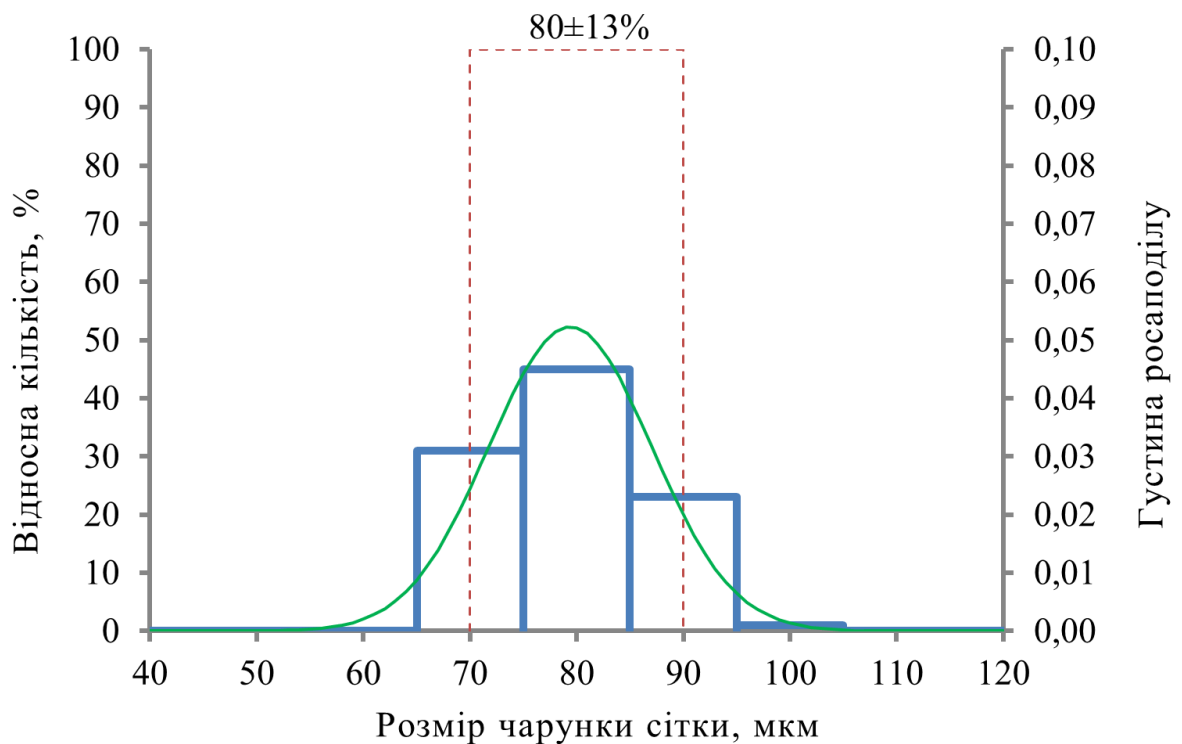
За отриманими середніми значеннями визначалися вибіркоче середнє математичне сподівання та середнє квадратичне відхилення. Визначилася кількість спостережень, що виходила за межі допуску, встановленого ТУ. Крім цього, розглядалася можливість використання для опису випадкових величин діаметра дроту та розміру чарунки сітки нормального розподілу, щільність якого має вигляд:

$$f(x, \mu, \sigma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\left(\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right)}, \quad (2.4)$$

де x – досліджуваний параметр; μ – математичне сподівання (відповідає середньому вибіркового значенню); σ – середньоквадратичне відхилення. Тобто оцінювалася близькість гістограм вибірок до нормального розподілу.

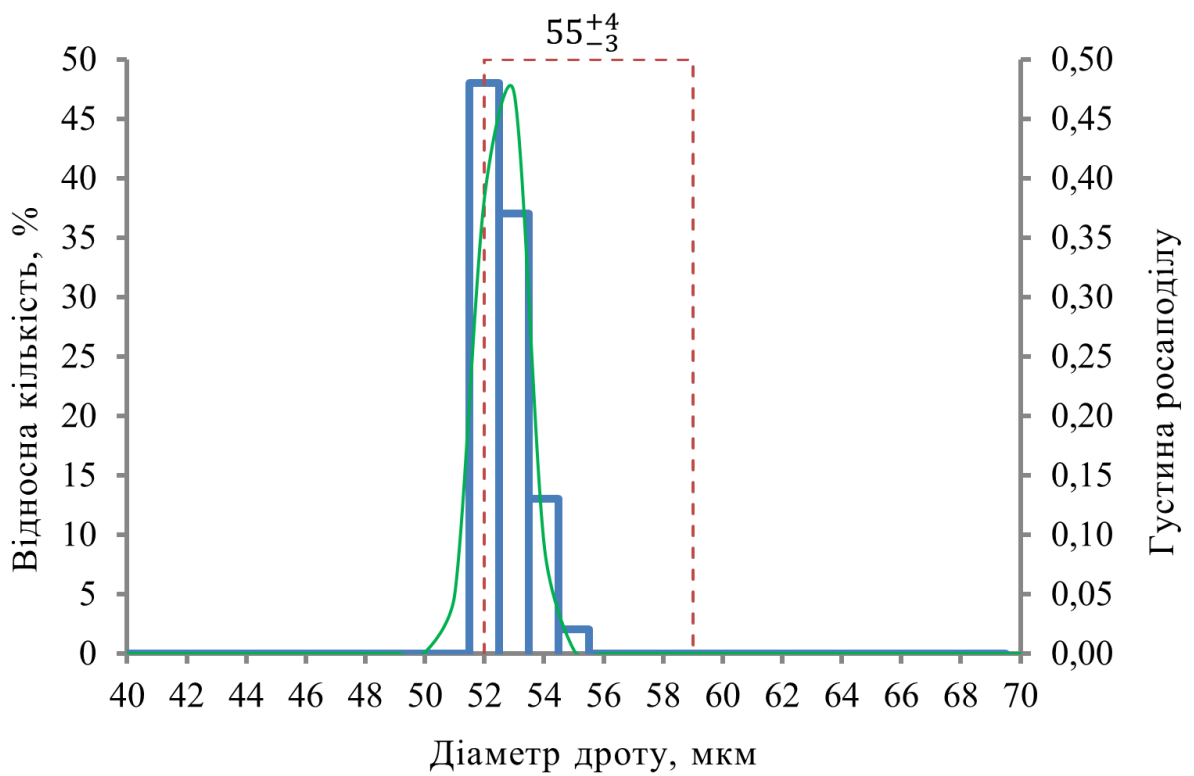


а)

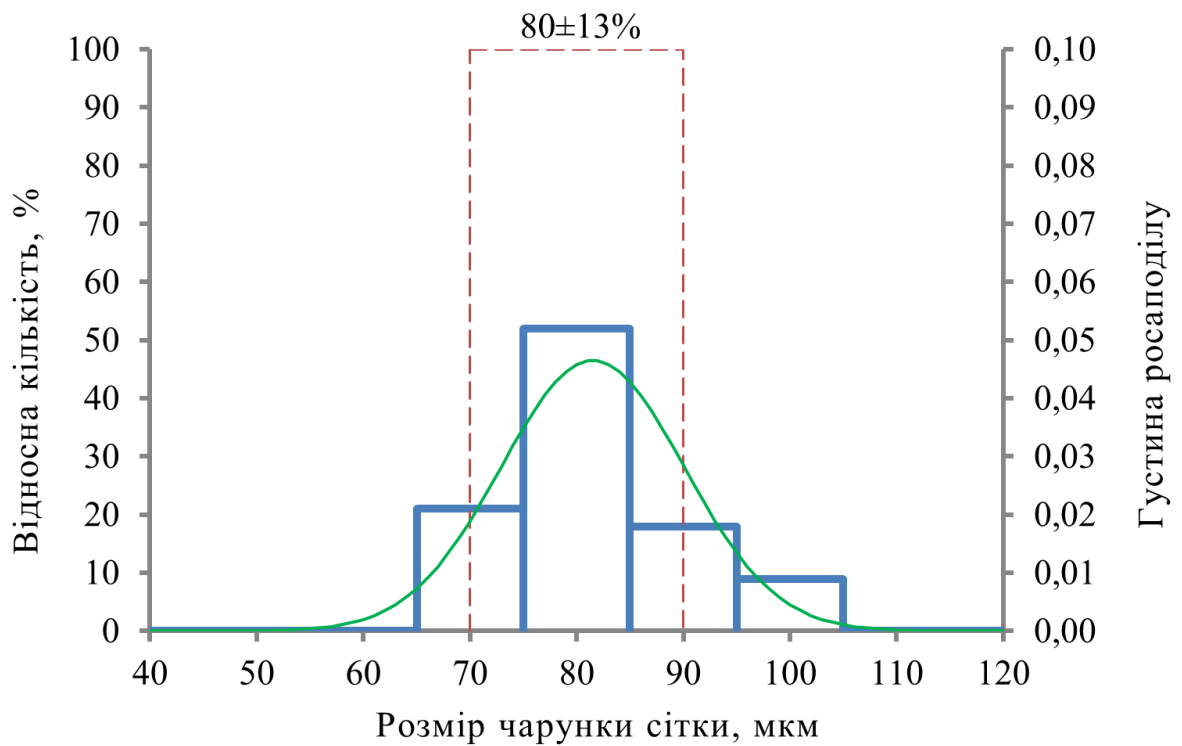


б)

Рис. 2.19. Результати вимірів геометричних розмірів зразка №1 нової (еталонної) сітки №008: а) – товщини дроту; б) – розміри чарунок



а)



б)

Рис. 2.20. Результати вимірів геометричних розмірів зразка №2 нової (еталонної) сітки №008: а) – товщини дроту; б) – розміри чарунок

Основні геометричні параметри сіток СРФ 1, 2 і 3, та зразків нових (еталонних) сіток №008, наведено в Таблиці 2.7 і 2.8.

Таблиця 2.7

Основні геометричні параметри дротів сіток

КП / СРФ	Середнє вибіркоче значення діаметру дроту, мкм	Розміри діаметру дроту,			Найменше значення діаметру дроту і його відносна кількість, мкм / %
		в межах допуску за ТУ (50_{-3}^{+4} мкм), %	перевищують межі допуску за ТУ, %	менше допуску за ТУ, %	
нова сітка №1	53,0	100	0,0	0,0	52 / 38
нова сітка №2	52,6	100	0,0	0,0	52 / 48
Комплект зразків №8 (14 років знаходження СРФ під впливом КП і їх парів)					
АТ СРФ 1	52,0	63,3	0,0	36,7	48 / 3,3
АТ СРФ 2	50,6	36,7	0,0	63,3	47 / 1,7
АТ СРФ 3	53,1	93,2	0,0	6,8	49 / 0,3
НДМГ СРФ 1	50,9	40,0	0,0	60,0	48 / 8,3
НДМГ СРФ 2	50,2	16,7	0,0	83,3	46 / 1,7
НДМГ СРФ 3	53,4	100	0,0	0,0	52 / 39
Комплект зразків №9 (15 років знаходження СРФ під впливом КП і їх парів)					
АТ СРФ 1	52,2	61,1	0,0	38,9	49 / 2,2
АТ СРФ 2	53,7	73,3	1,1	25,6	50 / 17,2
АТ СРФ 3	---	---	---	---	---
НДМГ СРФ 1	53,7	77,8	0,0	22,2	50 / 13,3
НДМГ СРФ 2	53,6	69,4	0,0	30,6	46 / 0,6
НДМГ СРФ 3	54,0	77,7	0,0	22,3	46 / 0,3
Комплект зразків №10 (15 років і 2 місяця знаходження СРФ під впливом КП і їх парів)					
АТ СРФ 1	53,4	85,1	0,0	14,9	49 / 0,6
АТ СРФ 2	52,8	90,8	0,0	9,2	48 / 0,8
АТ СРФ 3	53,1	79,0	0,0	21,0	51 / 21,0
НДМГ СРФ 1	53,3	82,0	0,0	18,0	48 / 0,6
НДМГ СРФ 2	---	---	---	---	---
НДМГ СРФ 3	52,8	73,0	0,0	27,0	50 / 6,0
Комплект зразків №11 (15 років і 2 місяця знаходження СРФ під впливом КП і їх парів)					
АТ СРФ 1	52,6	67,8	0,0	32,2	50 / 8,3
АТ СРФ 2	53,7	88,3	0,0	11,7	50 / 1,1
АТ СРФ 3	53,3	83,9	0,0	16,1	50 / 3,3
НДМГ СРФ 1	52,7	71,1	0,0	28,9	50 / 8,3
НДМГ СРФ 2	52,9	73,9	0,0	26,1	50 / 6,1
НДМГ СРФ 3	52,9	79,4	0,0	20,6	50 / 5,6
Комплект зразків №12 (17 років і 5 місяців знаходження СРФ під впливом КП і їх парів)					
АТ СРФ 1	53,4	75,0	2,8	22,2	50 / 12,2
АТ СРФ 2	53,9	84,4	0,0	15,6	48 / 0,6
АТ СРФ 3	52,1	51,3	0,5	48,2	46 / 0,5
НДМГ СРФ 1	52,7	65,0	0,0	35,0	50 / 24,4
НДМГ СРФ 2	53,5	78,9	0,0	21,1	50 / 9,4
НДМГ СРФ 3	53,5	68,7	1,5	29,8	42 / 0,3

Комплект зразків №13 (20 років знаходження СРФ під впливом КП і їх парів)					
АТ СРФ 1	50,8	42,7	0,6	56,7	42 / 0,6
АТ СРФ 2	52,0	63,3	0,0	36,7	49 / 3,3
АТ СРФ 3	50,8	30,6	0,0	69,4	48 / 6,1
НДМГ СРФ 1	51,0	39,4	0,0	60,6	46 / 0,6
НДМГ СРФ 2	51,6	55,0	0,0	45,0	47 / 2,2
НДМГ СРФ 3	51,4	44,4	0,0	55,6	47 / 0,6
Комплект зразків №14 (20 років і 10 місяців знаходження СРФ під впливом КП і їх парів)					
АТ СРФ 1	49,8	12,3	0,0	87,7	45 / 0,6
АТ СРФ 2	50,8	27,2	0,0	72,8	46 / 1,1
АТ СРФ 3	49,8	24,0	0,5	75,5	40 / 1,3
НДМГ СРФ 1	50,6	30,6	0,0	69,4	46 / 1,7
НДМГ СРФ 2	50,7	23,3	0,0	76,7	47 / 0,6
НДМГ СРФ 3	51,9	47,0	2,5	50,5	43 / 0,5
Комплект зразків №15 (23 рока знаходження СРФ під впливом КП і їх парів)					
АТ СРФ 1	52,5	70,6	0,0	29,4	48 / 3,3
АТ СРФ 2	52,9	77,8	0,0	22,2	48 / 1,1
АТ СРФ 3	52,2	59,0	0,0	41,0	46 / 0,8
НДМГ СРФ 1	53,4	81,7	0,0	18,3	48 / 0,6
НДМГ СРФ 2	53,1	76,7	0,0	23,3	48 / 0,6
НДМГ СРФ 3	52,2	63,8	0,0	36,3	46 / 1,3
Комплект зразків №16 (31 рік і 1 місяць знаходження СРФ під впливом КП і їх парів)					
АТ СРФ 1	50,6	36,7	0,0	63,3	46 / 2,8
АТ СРФ 2	50,8	36,1	0,0	63,9	45 / 0,6
АТ СРФ 3	50,1	23,8	0,0	76,3	46 / 1,0
НДМГ СРФ 1	50,3	22,2	0,0	77,8	47 / 2,2
НДМГ СРФ 2	50,7	25,6	0,0	74,4	47 / 3,3
НДМГ СРФ 3	50,8	45,8	0,0	54,3	45 / 1,0

Таблиця 2.8

Основні геометричні параметри чарунок сіток

КП / СРФ	Середнє вибіркоче значення розміру чарунки, мкм	Кількість чарунок, розміри яких			Найбільші значення розмірів чарунок і їх відносна кількість, мкм / %
		в межах допуску за ТУ (80мкм±13%), %	перевищують межі допуску за ТУ, %	менше допуску за ТУ, %	
нова сітка №1	79,4	99,0	1,0	0,0	100 / 1,0
нова сітка №2	81,5	91,0	9,0	0,0	100 / 9,0
Комплект зразків №8 (14 років знаходження СРФ під впливом КП і їх парів)					
АТ СРФ 1	83,2	85,0	11,7	3,3	97 / 1,7
АТ СРФ 2	81,0	83,4	8,3	8,3	96 / 1,7
АТ СРФ 3	77,8	85,6	3,8	10,6	96 / 0,3
НДМГ СРФ 1	79,4	90,0	6,7	3,3	95 / 3,3
НДМГ СРФ 2	83,8	90,0	8,3	1,7	97 / 1,7
НДМГ СРФ 3	77,4	87,5	3,0	9,5	96 / 0,5

Комплект зразків №9 (15 років знаходження СРФ під впливом КП і їх парів)					
АТ СРФ 1	83,6	69,4	25,6	5,0	101 / 0,6
АТ СРФ 2	80,1	85,6	8,3	6,1	105 / 0,6
АТ СРФ 3	---	---	---	---	---
НДМГ СРФ 1	81,8	73,8	15,6	10,6	111 / 0,6
НДМГ СРФ 2	83,1	76,7	20,0	3,3	101 / 0,6
НДМГ СРФ 3	76,0	69,9	6,3	23,8	103 / 0,5
Комплект зразків №10 (15 років і 2 місяця знаходження СРФ під впливом КП і їх парів)					
АТ СРФ 1	79,9	89,1	4,0	6,9	98 / 1,1
АТ СРФ 2	81,3	96,2	3,8	0,0	93 / 1,5
АТ СРФ 3	78,8	84,2	7,3	8,5	112 / 0,3
НДМГ СРФ 1	80,3	90,6	6,1	3,3	105 / 0,6
НДМГ СРФ 2	---	---	---	---	---
НДМГ СРФ 3	81,2	77,2	14,5	8,3	109 / 0,3
Комплект зразків №11 (15 років і 2 місяця знаходження СРФ під впливом КП і їх парів)					
АТ СРФ 1	79,8	95,0	2,2	2,8	100 / 2,2
АТ СРФ 2	78,1	97,2	0,0	2,8	90 / 13,3
АТ СРФ 3	78,0	98,3	0,6	1,1	100 / 0,6
НДМГ СРФ 1	77,8	90,5	1,7	7,8	100 / 1,7
НДМГ СРФ 2	79,2	94,4	3,9	1,7	110 / 0,6
НДМГ СРФ 3	77,8	95,0	0,6	4,4	100 / 0,6
Комплект зразків №12 (17 років і 5 місяців знаходження СРФ під впливом КП і їх парів)					
АТ СРФ 1	81,2	81,7	13,3	5,0	100 / 0,6
АТ СРФ 2	81,7	88,9	7,2	3,9	98 / 0,6
АТ СРФ 3	77,2	76,4	7,7	15,9	110 / 0,5
НДМГ СРФ 1	81,9	78,3	15,0	6,7	104 / 0,6
НДМГ СРФ 2	82,1	92,2	5,6	2,2	107 / 0,6
НДМГ СРФ 3	77,8	77,7	6,5	15,8	114 / 0,3
Комплект зразків №13 (20 років знаходження СРФ під впливом КП і їх парів)					
АТ СРФ 1	83,4	71,6	21,7	6,7	107 / 1,1
АТ СРФ 2	82,0	86,2	9,4	4,4	99 / 1,1
АТ СРФ 3	84,0	74,4	18,9	6,7	103 / 0,6
НДМГ СРФ 1	82,3	80,6	14,4	5,0	107 / 0,6
НДМГ СРФ 2	81,7	78,9	13,9	7,2	108 / 0,6
НДМГ СРФ 3	80,5	82,7	6,7	10,6	115 / 0,6
Комплект зразків №14 (20 років і 10 місяців знаходження СРФ під впливом КП і їх парів)					
АТ СРФ 1	86,1	73,9	22,2	3,9	113 / 0,6
АТ СРФ 2	82,3	96,1	3,9	0,0	107 / 0,6
АТ СРФ 3	81,9	77,2	16,5	6,3	112 / 0,3
НДМГ СРФ 1	83,7	81,1	16,1	2,8	110 / 0,6
НДМГ СРФ 2	82,7	96,1	3,9	0,0	92 / 0,6
НДМГ СРФ 3	80,2	80,7	9,8	9,5	110 / 0,3
Комплект зразків №15 (23 рока знаходження СРФ під впливом КП і їх парів)					
АТ СРФ 1	76,5	61,7	13,3	25,0	110 / 0,6
АТ СРФ 2	77,7	80,5	5,6	13,9	104 / 0,6
АТ СРФ 3	81,7	69,0	18,5	12,5	120 / 0,3
НДМГ СРФ 1	77,1	77,2	5,6	17,2	101 / 0,6
НДМГ СРФ 2	76,4	72,3	8,3	19,4	100 / 0,6
НДМГ СРФ 3	78,7	83,0	6,5	10,5	101 / 0,3

Комплект зразків №16 (31 рік і 1 місяць знаходження СРФ під впливом КП і їх парів)					
АТ СРФ 1	82,9	82,3	13,3	4,4	105 / 0,6
АТ СРФ 2	82,5	68,3	21,7	10,0	104 / 0,6
АТ СРФ 3	82,6	82,4	13,3	4,3	105 / 0,3
НДМГ СРФ 1	82,7	86,6	11,7	1,7	108 / 0,6
НДМГ СРФ 2	83,0	91,1	7,8	1,1	117 / 0,6
НДМГ СРФ 3	82,8	77,7	17,0	5,3	113 / 0,3

Порівняльний аналіз гістограм вимірів геометричних розмірів нової (еталонної) сітки №008, зразок №1 і 2 (Рис. 2.19 і 2.20) з гістограмами геометричних розмірів сіток СРФ 1, 2 і 3, що були демонтовані з баків АТ та НДМГ (комплекти зразків №8 – 16, Рис. 1 – 52 додатку Б), які мали термін перебування в рідкій фазі КП і під парами від 14 до 31 року та 1 місяця, а також даних вимірів наведених у Таблицях 2.7 і 2.8 свідчить, що з протягом часу:

- відбувається зміщення математичного сподівання (вибіркового середнього) значень діаметрів дроту в сторону їх зменшення;
- відбувається збільшення відносної кількості діаметрів дротів, що мають значення менше допуску, визначеного ТУ;
- відбувається поступове зменшення діаметрів дротів, що мають найменше значення, при стабілізації показника їх відносної кількості;
- відбувається зміщення математичного сподівання (вибіркового середнього) значень розмірів чарунок у бік їх збільшення;
- відбувається збільшення відсоткового змісту розмірів чарунок, що мають значення більші допуску за ТУ;
- відбувається поступове збільшення розмірів чарунок, що мають найбільше значення, при стабілізації показника їх відносної кількості;
- виявлено, що випадкова величина розміру чарунки має більшу схильність до нормального розподілу. Для гістограм діаметра дроту маємо зміщення основної маси спостережень у бік менших значень. Відповідно нормальний розподіл меншою мірою може бути використано для опису цієї випадкової величини.

Причиною всього вище перерахованого, а також наявності відкладень, опадів, плівок та гелів (див. розділ 2.3), які являють собою гідратовані

нітрати металів (головним чином алюмінію та заліза) – може бути корозія конструкційних матеріалів сіток СРФ та елементів конструкції паливної системи (баків) РН.

На Рис. 2.21 – 2.26 наведено графіки зміни основних геометричних параметрів сіток СРФ в залежності від терміну їх перебування в рідкій фазі КП і під його парами, за допомогою яких були визначені рівняння прямих, що апроксимують середні значення діаметрів дротів і розмірів чарунок сітки, а також найменші значення діаметрів дротів і найбільші значення розмірів чарунок. Лінійна апроксимація в залежності від часу перебування мала вигляд:

$$y = m\tau + a, \quad (2.5)$$

де a , m – параметри апроксимуючої лінійної залежності; τ – час протікання процесу.

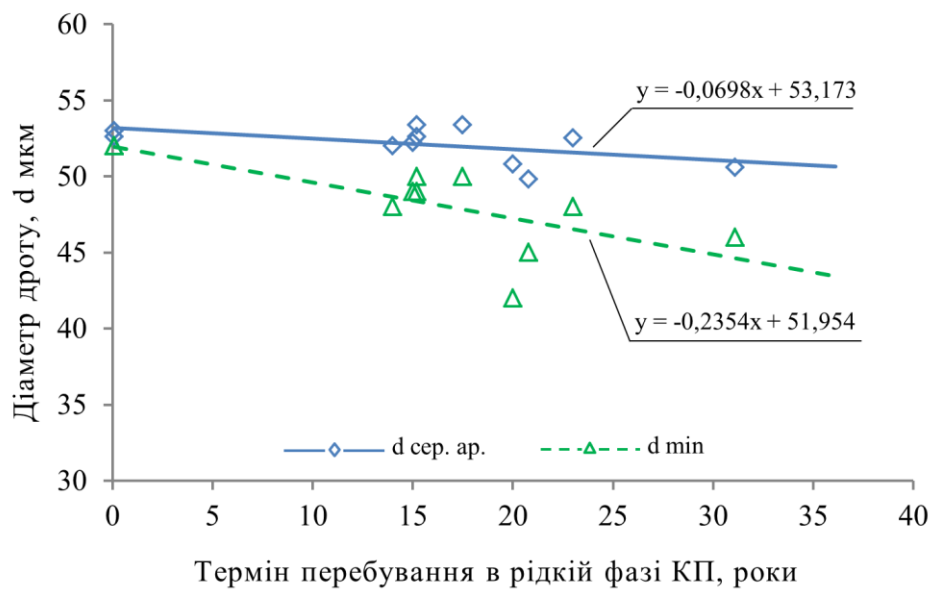
Параметри лінійної залежності (2.5) визначалися за методом найменших квадратів згідно з формулами:

$$m = \frac{n(\sum \tau y) - (\sum \tau)(\sum y)}{n(\sum(\tau^2)) - (\sum \tau)^2}, \quad (2.6)$$

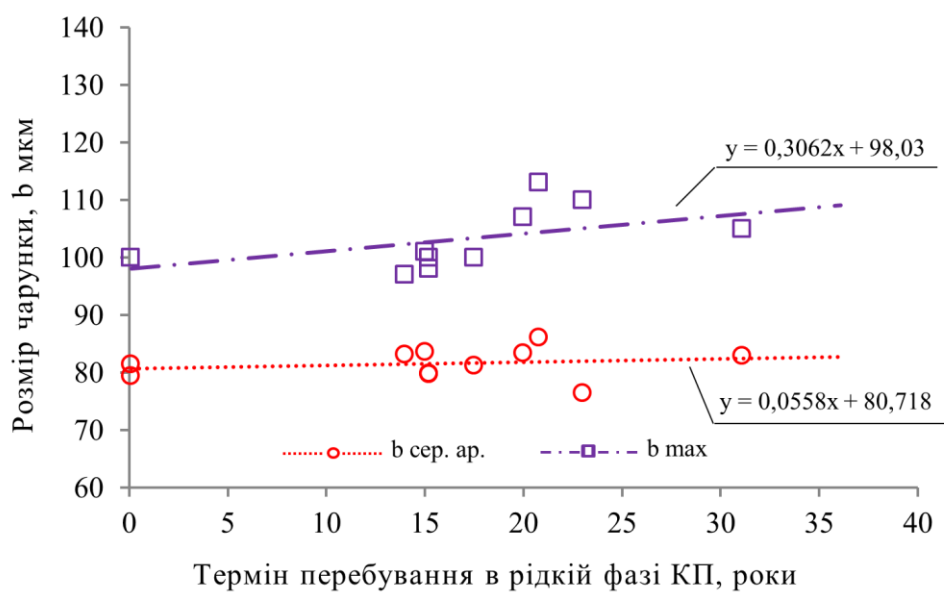
де y – обов'язковий аргумент функції незалежних значень τ ; m – коефіцієнти, що відповідають кожному значенню τ ; τ – необов'язковий аргумент багато значень якого вже відомі; a – постійна.

$$a = \bar{y} - m \bar{\tau}, \quad (2.7)$$

де $\bar{y} = \frac{\sum y}{n}$; $\bar{\tau} = \frac{\sum \tau}{n}$.



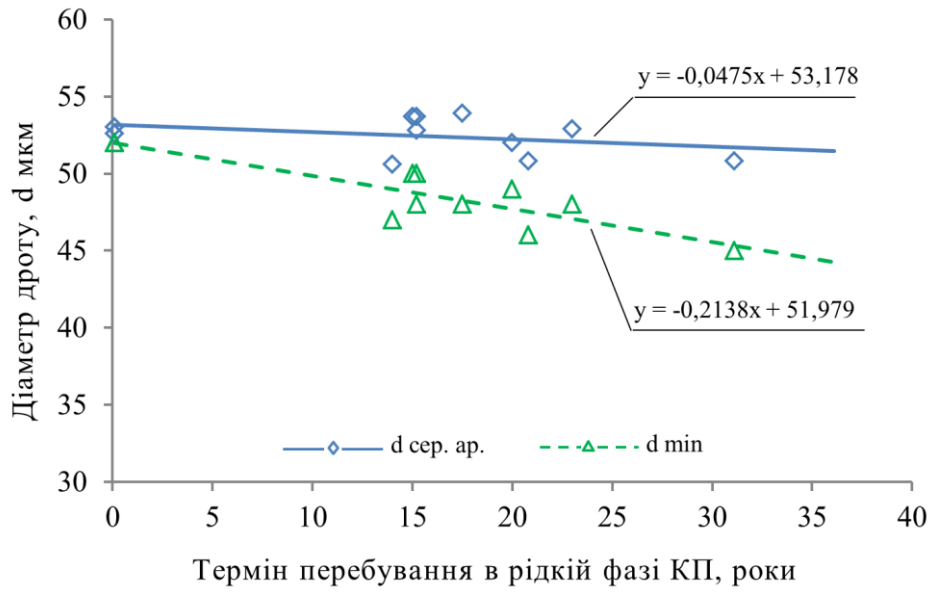
а)



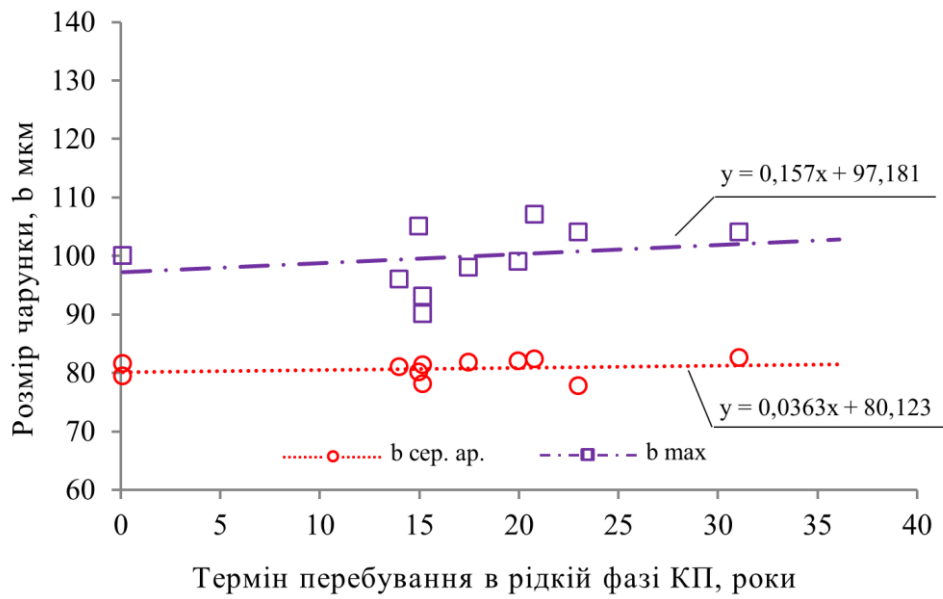
б)

Рис. 2.21. Графік зміни основних геометричних параметрів сіток СРФ 1 в залежності від терміну їх перебування в рідкій фазі КП АТ: а) – основні геометричні параметри дротів сіток СРФ; б) – основні геометричні параметри чарунок сіток СРФ; \diamond – середні значення діаметрів дроту; \triangle – найменші значення діаметрів дроту; \circ – середні значення розмірів чарунок; \square – найбільші значення розмірів чарунок;

— — — — — апроксимаційні прямі



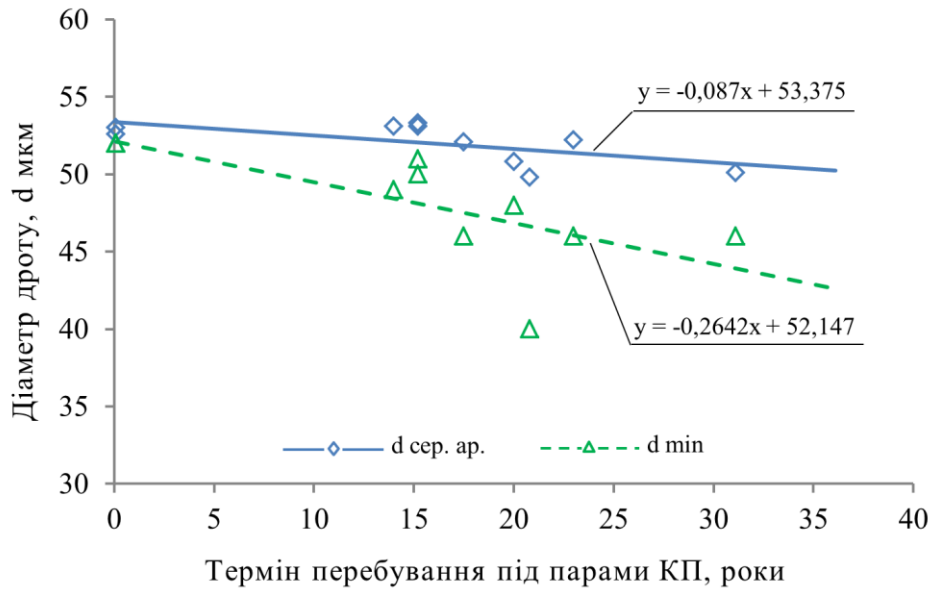
а)



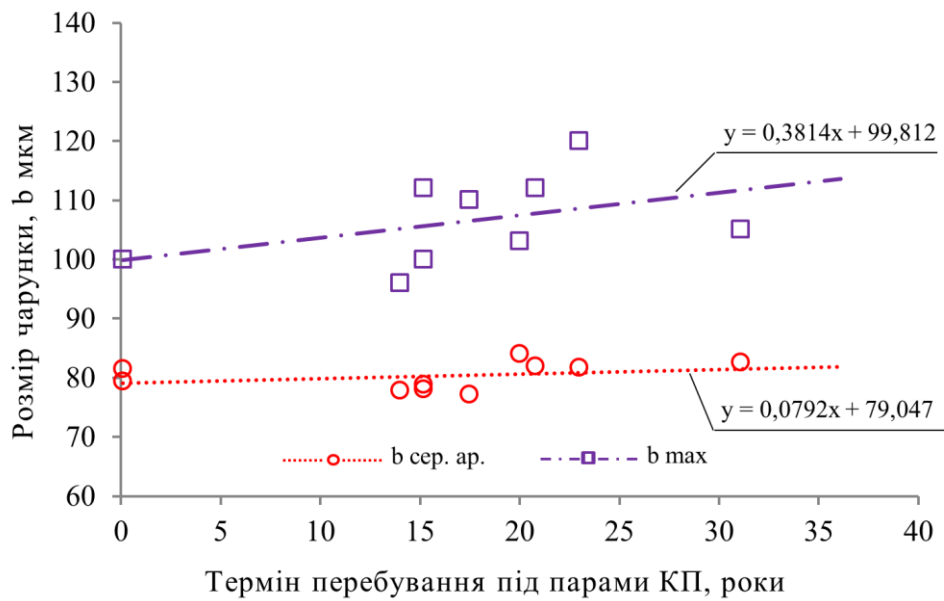
б)

Рис. 2.22. Графік зміни основних геометричних параметрів сіток СРФ 2 в залежності від терміну їх перебування в рідкій фазі КП АТ: а) – основні геометричні параметри дротів сіток СРФ; б) – основні геометричні параметри чарунок сіток СРФ; \diamond – середні значення діаметрів дроту; \triangle – найменші значення діаметрів дроту; \circ – середні значення розмірів чарунок; \square – найбільші значення розмірів чарунок;

— — — — — апроксимаційні прямі



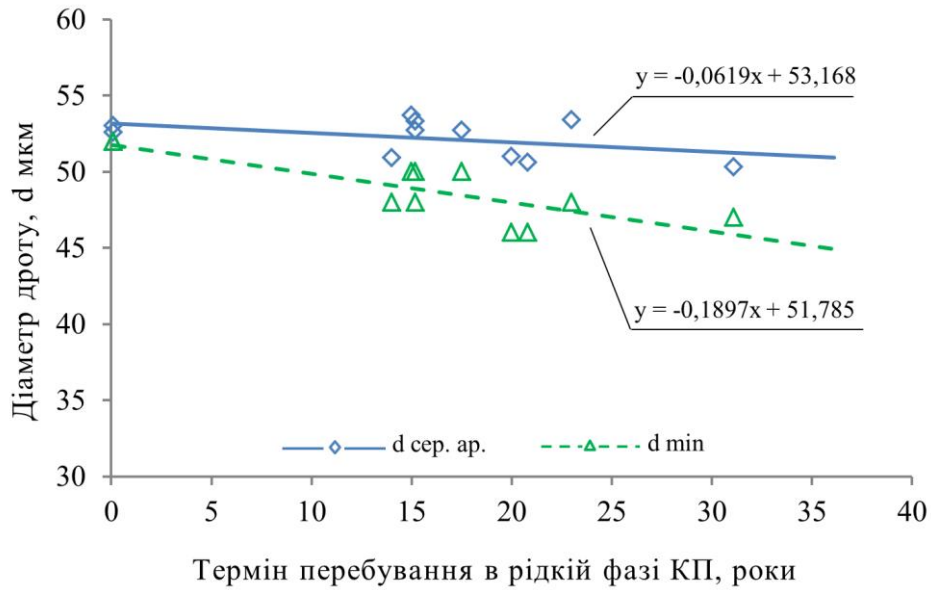
а)



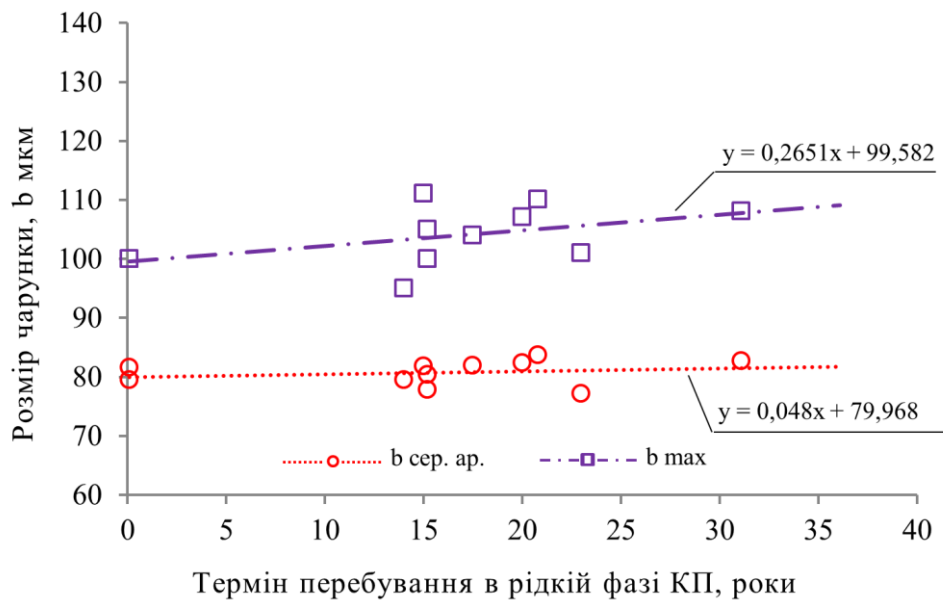
б)

Рис. 2.23. Графік зміни основних геометричних параметрів сіток СРФ 3 в залежності від терміну їх перебування під парами КП АТ: а) – основні геометричні параметри дротів сіток СРФ; б) – основні геометричні параметри чарунок сіток СРФ; \diamond – середні значення діаметрів дроту; \triangle – найменші значення діаметрів дроту; \circ – середні значення розмірів чарунок; \square – найбільші значення розмірів чарунок;

— — — — — апроксимаційні прямі



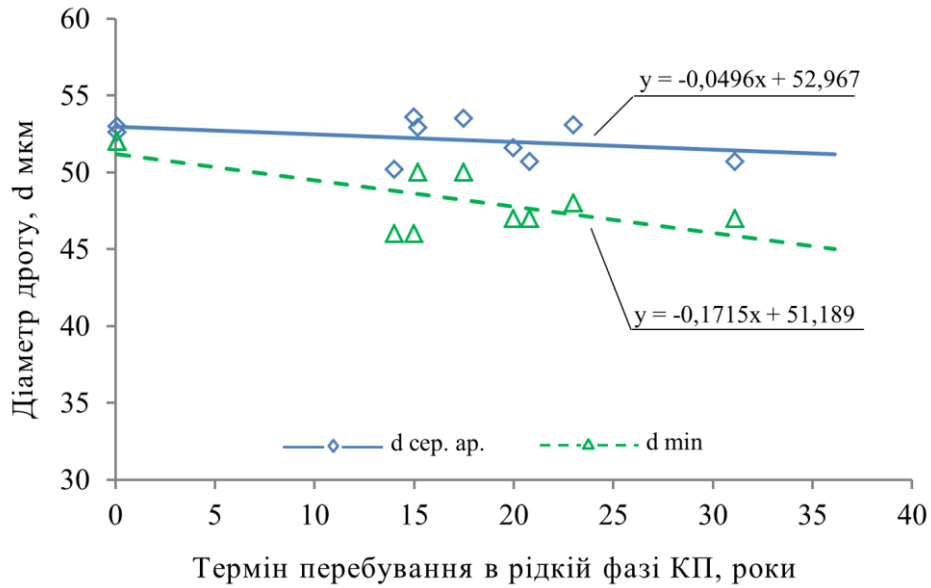
а)



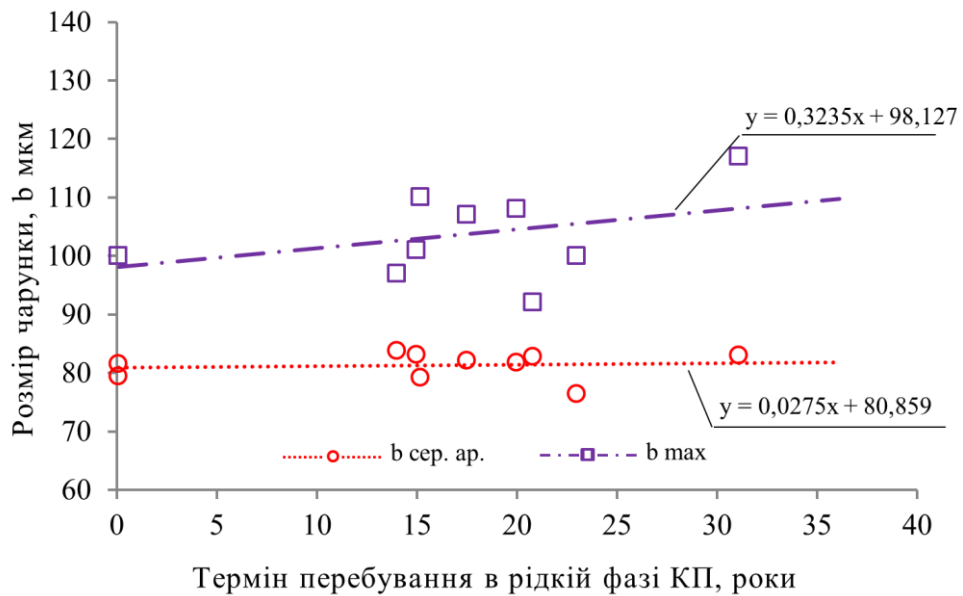
б)

Рис. 2.24. Графік зміни основних геометричних параметрів сіток СРФ 1 в залежності від терміну їх перебування в рідкій фазі КП НДМГ: а) – основні геометричні параметри дротів сіток СРФ; б) – основні геометричні параметри чарунок сіток СРФ; \diamond – середні значення діаметрів дроту; \triangle – найменші значення діаметрів дроту; \circ – середні значення розмірів чарунок; \square – найбільші значення розмірів чарунок;

— — — — — апроксимаційні прямі



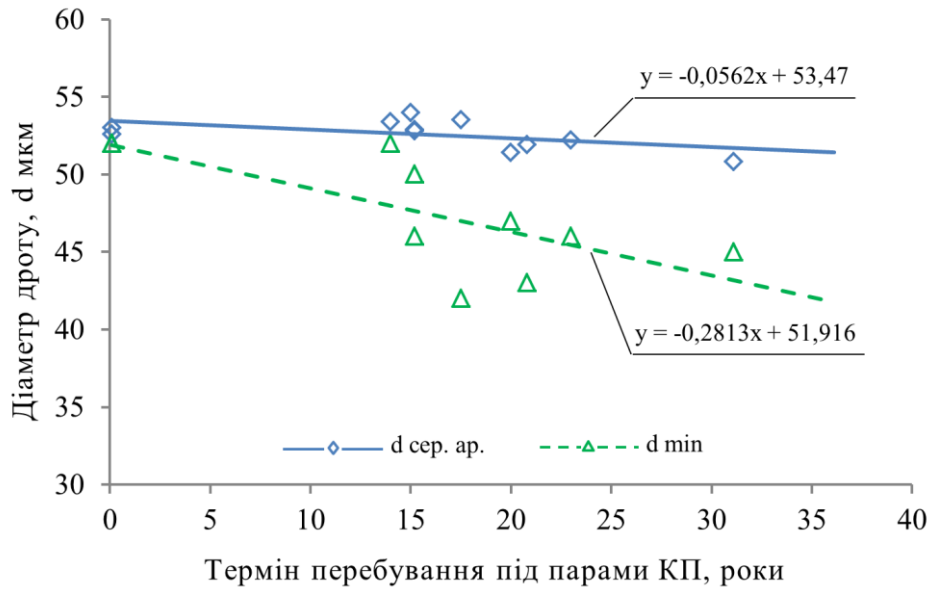
а)



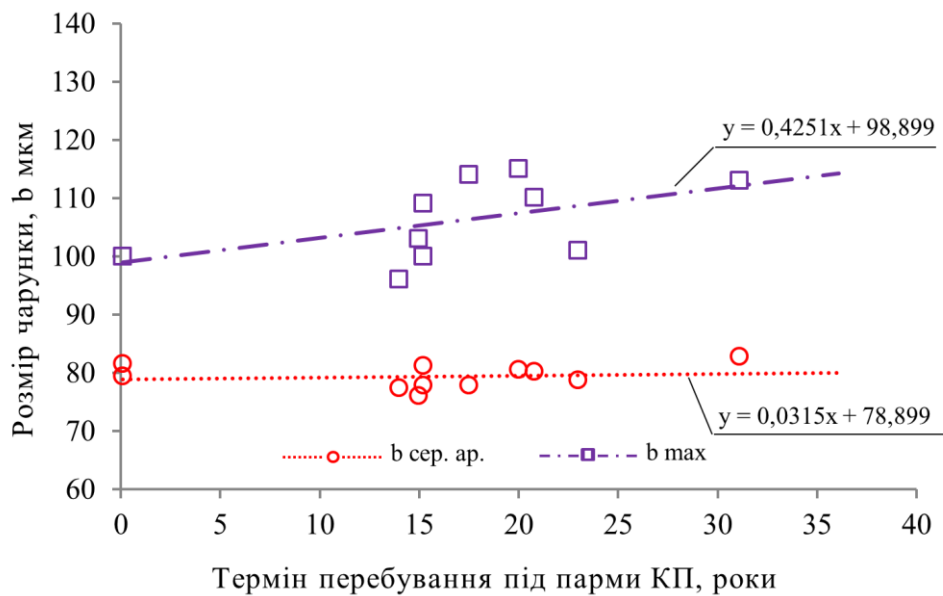
б)

Рис. 2.25. Графік зміни основних геометричних параметрів сіток СРФ 2 в залежності від терміну їх перебування в рідкій фазі КП НДМГ: а) – основні геометричні параметри дротів сіток СРФ; б) – основні геометричні параметри чарунок сіток СРФ; \diamond – середні значення діаметрів дроту; \triangle – найменші значення діаметрів дроту; \circ – середні значення розмірів чарунок; \square – найбільші значення розмірів чарунок;

— — — — — апроксимаційні прямі



а)



б)

Рис. 2.26. Графік зміни основних геометричних параметрів сіток СРФ 3 в залежності від терміну їх перебування під парами КП НДМГ: а) – основні геометричні параметри дротів сіток СРФ; б) – основні геометричні параметри чарунок сіток СРФ; \diamond – середні значення діаметрів дроту; \triangle – найменші значення діаметрів дроту; \circ – середні значення розмірів чарунок; \square – найбільші значення розмірів чарунок;

— — — — — апроксимаційні прямі

З графіків Рис. 2.21 – 2.26 видно, що з протягом часу йде поступове зменшення середніх значень діаметрів дротів і розмірів мінімальних діаметрів дротів, разом зі збільшенням середніх значень розмірів чарунок і розмірів найбільших чарунок сітки. Така фізична картина ймовірноше обумовлена впливом суцільної (рівномірної) корозії на конструкційний матеріал сітки СРФ нержавіючої сталі марки 12Х18Н10Т в наслідок її тривалого терміну перебування в рідкій фазі і під парами КП АТ та НДМГ. Використовуючи таку гіпотезу, швидкість суцільної (рівномірної) корозії можна розрахувати за формулою [205, 206]:

$$V_{\tau}^* = \frac{\Delta L}{2 \cdot \tau} = \frac{a - (m\tau + a)}{2 \cdot \tau}, \quad (2.8)$$

де V_{τ}^* – швидкість корозії в момент часу τ ; ΔL – зменшення середніх значень діаметрів дротів (Δd), або збільшення середніх значень розмірів чарунок сітки (Δb); τ – час протікання процесу; a , m – постійні лінійної залежності (2.5), визначені відповідно до значення діаметру дроту (d) або розміру чарунки сітки (b).

Результати розрахунків зміни основних геометричних і граничних параметрів сіток СРФ та швидкості суцільної (рівномірної) корозії за 31 рік і 1 місяць перебування сталі 12Х18Н10Т в рідкій фазі та під парами КП АТ і НДМГ наведено у Таблицях 2.9 та 2.10 [205, 206].

Таблиця 2.9

Зміна основних геометричних параметрів сіток СРФ та швидкість суцільної (рівномірної) корозії за 31 рік і 1 місяць перебування сталі 12Х18Н10Т в рідкій фазі і під парами КП АТ та НДМГ, відносно зменшення діаметрів дротів та збільшення розмірів чарунок сітки

КП / СРФ	Зменшення середніх значень діаметрів дротів за 31 рік і 1 місяць (Δd), мкм	Збільшення середніх значень розмірів чарунок сітки за 31 рік і 1 місяць (Δb), мкм	Швидкість корозії відносно зменшення діаметрів дротів ($V_{\tau d}^*$), мм на рік	Швидкість корозії відносно збільшення розмірів чарунок сітки ($V_{\tau b}^*$), мм на рік
АТ СРФ 1	2,17	1,74	$0,35 \cdot 10^{-4}$	$0,28 \cdot 10^{-4}$
АТ СРФ 2	1,48	1,13	$0,24 \cdot 10^{-4}$	$0,18 \cdot 10^{-4}$
АТ СРФ 3	2,71	2,46	$0,44 \cdot 10^{-4}$	$0,40 \cdot 10^{-4}$
НДМГ СРФ 1	1,93	1,49	$0,31 \cdot 10^{-4}$	$0,24 \cdot 10^{-4}$
НДМГ СРФ 2	1,54	0,86	$0,25 \cdot 10^{-4}$	$0,14 \cdot 10^{-4}$
НДМГ СРФ 3	1,75	0,98	$0,28 \cdot 10^{-4}$	$0,16 \cdot 10^{-4}$

Таблиця 2.10

Зміна граничних геометричних параметрів сіток СРФ та швидкість суцільної (рівномірної) корозії за 31 рік і 1 місяць перебування сталі 12Х18Н10Т в рідкій фазі і під парами КП АТ та НДМГ, відносно зменшення мінімальних діаметрів дротів та збільшення розмірів найбільших чарунок сітки

КП / СРФ	Зменшення значень розмірів мінімальних діаметрів дротів за 31 рік і 1 місяць (Δd_{min}), мкм	Збільшення значень розмірів найбільших чарунок за 31 рік і 1 місяць (Δb_{max}), мкм	Швидкість корозії відносно зменшення розмірів мінімальних діаметрів дротів ($V_{\tau dmin}^*$), мм на рік	Швидкість корозії відносно збільшення розмірів найбільших чарунок сітки ($V_{\tau bmax}^*$), мм на рік
АТ СРФ 1	7,32	9,52	$1,18 \cdot 10^{-4}$	$1,53 \cdot 10^{-4}$
АТ СРФ 2	6,65	4,88	$1,07 \cdot 10^{-4}$	$0,76 \cdot 10^{-4}$
АТ СРФ 3	8,22	11,86	$1,32 \cdot 10^{-4}$	$1,91 \cdot 10^{-4}$
НДМГ СРФ 1	5,90	8,24	$0,95 \cdot 10^{-4}$	$1,33 \cdot 10^{-4}$
НДМГ СРФ 2	5,33	10,06	$0,86 \cdot 10^{-4}$	$1,62 \cdot 10^{-4}$
НДМГ СРФ 3	8,75	13,22	$1,41 \cdot 10^{-4}$	$2,13 \cdot 10^{-4}$

Загальний аналіз отриманих результатів розрахунків зміни основних геометричних і граничних параметрів сіток СРФ та швидкості суцільної

(рівномірної) корозії за 31 рік і 1 місяць перебування сталі 12Х18Н10Т в рідкій фазі і під парами КП АТ та НДМГ (Таблиця 2.9 і 2.10) свідчить, що [205, 206]:

- максимальне значення швидкості суцільної (рівномірної) корозії для сіток СРФ 1 і 2, які перебували в рідкій фазі АТ, отримане за результатами апроксимації середніх значень зміни основних геометричних параметрів сіток дорівнює $\sim 0,35 \cdot 10^{-4}$ мм на рік;

- максимальне значення швидкості суцільної (рівномірної) корозії для сіток СРФ 3, які перебували під парами АТ, отримане за результатами апроксимації середніх значень зміни основних геометричних параметрів сіток дорівнює $\sim 0,44 \cdot 10^{-4}$ мм на рік;

- максимальне значення швидкості суцільної (рівномірної) корозії для сіток СРФ 1 і 2, які перебували в рідкій фазі АТ, отримане за результатами апроксимації середніх значень зміни граничних геометричних параметрів сіток дорівнює $\sim 1,53 \cdot 10^{-4}$ мм на рік;

- максимальне значення швидкості суцільної (рівномірної) корозії для сіток СРФ 3, які перебували під парами АТ, отримане за результатами апроксимації середніх значень зміни граничних геометричних параметрів сіток дорівнює $\sim 1,91 \cdot 10^{-4}$ мм на рік;

- максимальне значення швидкості суцільної (рівномірної) корозії для сіток СРФ 1 і 2, які перебували в рідкій фазі НДМГ, отримане за результатами апроксимації середніх значень зміни основних геометричних параметрів сіток дорівнює $\sim 0,31 \cdot 10^{-4}$ мм на рік;

- максимальне значення швидкості суцільної (рівномірної) корозії для сіток СРФ 3, які перебували під парами НДМГ, отримане за результатами апроксимації середніх значень зміни основних геометричних параметрів сіток дорівнює $\sim 0,28 \cdot 10^{-4}$ мм на рік;

- максимальне значення швидкості суцільної (рівномірної) корозії для сіток СРФ 1 і 2, які перебували в рідкій фазі НДМГ, отримане за результатами апроксимації середніх значень зміни граничних геометричних параметрів сіток дорівнює $\sim 1,62 \cdot 10^{-4}$ мм на рік;

- максимальне значення швидкості суцільної (рівномірної) корозії для сіток СРФ 3, які перебували під парами НДМГ, отримане за результатами апроксимації середніх значень зміни граничних геометричних параметрів сіток дорівнює $\sim 2,13 \cdot 10^{-4}$ мм на рік;

- швидкість суцільної (рівномірної) корозії для сіток СРФ 3, які перебували під парами АТ перевищує швидкість корозії для сіток СРФ 1 і 2, які перебували в рідкій фазі АТ на ~ 26 % для середньо арифметичних значень зміни основних геометричних параметрів сіток і ~ 25 %, для середньо арифметичних значень зміни граничних геометричних параметрів сіток;

- швидкість суцільної (рівномірної) корозії для сіток СРФ 3, які перебували під парами НДМГ нижче швидкість корозії для сіток СРФ 1 і 2, які перебували в рідкій фазі НДМГ на ~ 10 % для середньо арифметичних значень зміни основних геометричних параметрів сіток і на $\sim 31,5$ % перевищує, для середньо арифметичних значень зміни граничних геометричних параметрів сіток.

Швидкість корозії відносно збільшення розмірів найбільших чарунок сітки ($V_{\tau b max}^*$) має найбільші значення, що, зокрема, може бути не тільки наслідком протікання корозійних процесів, а й механічним розтягуванням полотна сітки, внаслідок його тривалої експлуатації.

Для СРФ 1 і 2, що перебувають в рідкій фазі КП і для СРФ 3, що перебувають під парами КП, виходячи з даних, наведених у Таблицях 2.9 і 2.10, діапазон отриманих значень швидкості корозії складає [205, 206]:

- АТ СРФ 1 $- V_{\tau max}^* = (0,28 \dots 1,53) \cdot 10^{-4}$ мм на рік;
- АТ СРФ 2 $- V_{\tau max}^* = (0,18 \dots 1,07) \cdot 10^{-4}$ мм на рік;
- АТ СРФ 3 $- V_{\tau max}^* = (0,40 \dots 1,91) \cdot 10^{-4}$ мм на рік;
- НДМГ СРФ 1 $- V_{\tau max}^* = (0,24 \dots 1,33) \cdot 10^{-4}$ мм на рік;
- НДМГ СРФ 2 $- V_{\tau max}^* = (0,14 \dots 1,62) \cdot 10^{-4}$ мм на рік;
- НДМГ СРФ 3 $- V_{\tau max}^* = (0,16 \dots 2,13) \cdot 10^{-4}$ мм на рік.

Межи використання отриманих результатів: матеріал – нержавіюча сталь марки 12Х18Н10Т та близькі до неї за характеристиками; рідини – АТ, НДМГ; пари – АТ, НДМГ.

Для практичних розрахунків введемо поняття коефіцієнту максимальної швидкості корозії, який буде визначатися відносно збільшення розмірів чарунок сітки [205, 206]:

$$K_{V_{\tau}^* max} = \frac{b_0 + 2V_{\tau}^* max \cdot \tau}{b_0} = A + B \cdot \tau, \quad (2.9)$$

де b_0 – номінальний розмір чарунки за ТУ; $B = \frac{2V_{\tau}^* max}{b_0}$.

Відповідно до формули (2.11) коефіцієнту максимальної швидкості корозії буде складати, для [205, 206]:

- АТ СРФ 1 – $K_{V_{\tau}^* max} = 1 + 0,0038 \cdot \tau$;
- АТ СРФ 2 – $K_{V_{\tau}^* max} = 1 + 0,0027 \cdot \tau$;
- АТ СРФ 3 – $K_{V_{\tau}^* max} = 1 + 0,0048 \cdot \tau$;
- НДМГ СРФ 1 – $K_{V_{\tau}^* max} = 1 + 0,0033 \cdot \tau$;
- НДМГ СРФ 2 – $K_{V_{\tau}^* max} = 1 + 0,0040 \cdot \tau$;
- НДМГ СРФ 3 – $K_{V_{\tau}^* max} = 1 + 0,0053 \cdot \tau$.

У подальших інженерних розрахунках доцільніше використовувати коефіцієнти максимальної швидкості корозії отримані для АТ і НДМГ СРФ 3, як ті що відповідають найгіршому випадку процесу тривалої експлуатації СРФ капілярних ЗЗС палива.

2.7. Висновки за розділом 2

У розділі 2 отримано наступні висновки щодо швидкості корозії основного конструкційного матеріалу СРФ капілярних ЗЗС палива протягом тривалого терміну їх експлуатації:

1. Результати аналізу хімічного складу речовин, що знаходились на поверхні зразків сіток СРФ, показали, що склад катіонів на сітках з баків окислювача та пального практично аналогічний. Виявлені катіони металів

відповідають елементам, що входять до складу сплаву алюмінію та сталі – основних конструкційних матеріалів паливної системи, що дефектується.

2. За результатами аналізу процесів взаємодії конструкційного матеріалу сіток СРФ з КП АТ та НДМГ і їх парами та впливу різноманітних факторів на швидкість корозії визначено, що АТ та НДМГ мають низьку корозійну активність по відношенню до нержавіючої сталі 12Х18Н10Т. Сталь 12Х18Н10Т не піддається в АТ і НДМГ локальним видам корозії (піттинговій, міжкристалічній, крапковій, контактній, щілинній та корозійному розтріскуванню під напругою). Присутня у якості технологічної домішки в АТ азотна кислота збільшує швидкість корозії нержавіючої сталі 12Х18Н10Т. Однак при наявності азотної кислоти в АТ у межах норми, збільшення швидкості корозії сталі 12Х18Н10Т незначне. Без врахування корозії в початковий період, швидкість суцільної (рівномірної) корозії для сталі 12Х18Н10Т при температурі 50 °С в АТ та НДМГ складатиме $\leq 1 \cdot 10^{-4}$ мм на рік.

3. Результати металографічних досліджень зразків сіток СРФ свідчать про наявність суцільного (рівномірного) корозійного враження поверхні дротів сіток СРФ. Швидкість корозії конструкційного матеріалу сіток СРФ сталі 12Х18Н10Т, визначена за максимальною глибиною мікронерівності поверхні дротів (~ 1 мкм), складає $\sim 0,48 \cdot 10^{-4}$ мм на рік.

4. Визначена швидкість суцільної (рівномірної) корозії конструкційного матеріалу сіток СРФ сталі 12Х18Н10Т, що тривалий термін перебувала в рідкій фазі КП (АТ та НДМГ) і під парами. Отримані значення добре корелюються з результатами аналізу процесів взаємодії конструкційних матеріалів сіток СРФ та елементів конструкції паливної системи (баків) з КП АТ та НДМГ і їх парами, та металографічних досліджень зразків сіток СРФ на наявність корозії.

5. Вперше виявлено, що корозія сталі 12Х18Н10Т у газовій фазі азотного тетроксиду та несиметричного диметилгідразину протікає в $\sim 1,5$ рази швидше, ніж у рідкій. У середньому вона, майже у 2 рази перевищує

визначене теоретичне значення, яке дорівнює $1 \cdot 10^{-4}$ мм на рік. Складає $1,91 \cdot 10^{-4}$ для азотного тетроксиду та $2,13 \cdot 10^{-4}$ для несиметричного диметилгідразину, що еквівалентно збільшенню розміру чарунок (на 31 рік експлуатації) з номінального значення у 80 мкм до 91,8 мкм (для азотного тетроксиду) та 93,2 мкм (для несиметричного диметилгідразину)

б. Розраховано коефіцієнти максимальної швидкості корозії, застосування яких дозволить вдосконалити інженерні методики розрахунків основних параметрів СРФ капілярних ЗЗС палива під час їх проектування.

Основні наукові результати, що представлені у даному розділі, опубліковані у роботах [205, 206, 208 – 213].

РОЗДІЛ 3.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ КАПІЛЯРНОЇ УТРИМУЮЧОЇ ЗДАТНОСТІ СІТЧАСТИХ РОЗДІЛЮВАЧІВ ФАЗ В ПРОЦЕСІ ДОВГОТРИВАЛОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

Для остаточного вибору конструкційного матеріалу, типу плетіння та геометричних характеристик сіток СРФ при проектуванні капілярних ЗЗС палива, необхідне експериментальне визначення (підтвердження) їх КУЗ. Неточності, які допускаються технічною документацією в процесі виготовлення дротів сіток, суттєво впливають на значення ЕКД, щільності фільтрації та коефіцієнту гідравлічного опору. Наприклад, розкид дослідних значень коефіцієнтів гідравлічного опору, які були отримані різними авторами, може сягати $\pm 60\%$ [1].

Експериментальне вимірювання КУЗ потрібно і для підтвердження працездатності капілярних ЗЗС у складі паливної системи при тривалій експлуатації КЛА. В попередніх розділах було з'ясовано, що у процесі довготривалого знаходження під впливом компонентів палива та їх парів на поверхні дроту сіток можливо утворення: плівок, гелів, опадів внаслідок хімічного розпаду КП та корозійних ушкоджень. Це впливає на геометричні параметри чарунок сітки, та може значно збільшити значення контактного куту змочування і таким чином, сприяти критичному зменшенню КУЗ СРФ капілярного ЗЗС палива [1].

3.1 Об'єкт, предмет, методи дослідження та обладнання

Для визначення впливу тривалого перебування елементів капілярних ЗЗС палива в КП на їх параметри було проведено експериментальні дослідження зміни КУЗ СРФ на зразках сіток, що тривалий термін (від 14 до 31 року) перебували в рідкій фазі КП (АТ і НДМГ) та під їх парами.

Досліджувалася втрата КУЗ, внаслідок порушення рівноваги зовнішніх та внутрішніх сил на ПРФ «рідина-газ» капіляру в чарунці сітки КРФ.

В якості об'єкту дослідження розглядалися СРФ, що являють собою сітки саржевого типу переплетення з квадратними чарунками у світлі, які закріплені у металевій окантовці (наведено у розділі 2). Сітки СРФ 1 і 2 знаходились в КП, а СРФ 3 – в парах.

У Таблиці 3.1 наведено дані щодо номерів комплектів зразків (КЗ), СРФ капілярних ЗЗС палива, терміну їх перебування в рідкій фазі КП та під їх парами.

Таблиці 3.1

Данні, що до номерів КЗ, СРФ капілярних ЗЗС палива, терміну їх перебування в рідкій фазі КП та під їх парами

№ п/п	Номер КЗ	КП / СРФ	Термін знаходження СРФ в рідкій фазі КП та під його парами	
1	№8	АТ СРФ 1	рідка фаза	14 років
		АТ СРФ 2	рідка фаза	
		АТ СРФ 3	пари	
		НДМГ СРФ 1	рідка фаза	
		НДМГ СРФ 2	рідка фаза	
		НДМГ СРФ 3	пари	
2	№9	АТ СРФ 1	рідка фаза	15 років
		АТ СРФ 2	рідка фаза	
		АТ СРФ 3	пари	
		НДМГ СРФ 1	рідка фаза	
		НДМГ СРФ 2	рідка фаза	
		НДМГ СРФ 3	пари	
3	№10	АТ СРФ 1	рідка фаза	15 років 2 місяця
		АТ СРФ 2	рідка фаза	
		АТ СРФ 3	пари	
		НДМГ СРФ 1	рідка фаза	
		НДМГ СРФ 2	рідка фаза	
		НДМГ СРФ 3	пари	
4	№11	АТ СРФ 1	рідка фаза	15 років 2 місяця
		АТ СРФ 2	рідка фаза	
		АТ СРФ 3	пари	
		НДМГ СРФ 1	рідка фаза	
		НДМГ СРФ 2	рідка фаза	
		НДМГ СРФ 3	пари	
5	№12	АТ СРФ 1	рідка фаза	17 років 5 місяців
		АТ СРФ 2	рідка фаза	
		АТ СРФ 3	пари	
		НДМГ СРФ 1	рідка фаза	
		НДМГ СРФ 2	рідка фаза	
		НДМГ СРФ 3	пари	

6	№13	АТ СРФ 1	рідка фаза	20 років
		АТ СРФ 2	рідка фаза	
		АТ СРФ 3	пари	
		НДМГ СРФ 1	рідка фаза	
		НДМГ СРФ 2	рідка фаза	
		НДМГ СРФ 3	пари	
7	№14	АТ СРФ 1	рідка фаза	20 років 10 місяців
		АТ СРФ 2	рідка фаза	
		АТ СРФ 3	пари	
		НДМГ СРФ 1	рідка фаза	
		НДМГ СРФ 2	рідка фаза	
		НДМГ СРФ 3	пари	
8	№15	АТ СРФ 1	рідка фаза	23 роки
		АТ СРФ 2	рідка фаза	
		АТ СРФ 3	пари	
		НДМГ СРФ 1	рідка фаза	
		НДМГ СРФ 2	рідка фаза	
		НДМГ СРФ 3	пари	
9	№16	АТ СРФ 1	рідка фаза	31 рік 1 місяць
		АТ СРФ 2	рідка фаза	
		АТ СРФ 3	пари	
		НДМГ СРФ 1	рідка фаза	
		НДМГ СРФ 2	рідка фаза	
		НДМГ СРФ 3	пари	

Для дослідження зміни КУЗ СРФ капілярних ЗЗС палива, які тривалий термін знаходились під впливом хімічно агресивних КП та їх парів було використано – бульбашковий метод [1].

Проведення фізичного експерименту здійснювалось з використанням методики планування експерименту [190] та обробки результатів вимірювань і визначення їх похибок [191].

Випробування СРФ проводилися на дослідній установці [195, 208, 209, 212], схему якої та фотографії ЕВ з фіксацією поодинокого прориву бульбашок газу і масового прориву групи бульбашок крізь чарунки сітки наведено на Рис. 3.1.

Дослідна установка являє з себе товстостінну циліндричну ємність 1 з нержавіючої сталі, розділену перегородкою 2 на верхній та нижній відсіки. У центрі перегородки виконано отвір з фланцем для закріплення СРФ 3. У стінках кожного відсіку виконано по два діаметрально розташованих

ілюмінатора 4. Ще один такий самий ілюмінатор розміщений на кришці верхнього відсіку. По центру нижнього днища відсіку встановлений штуцер з каліброваним насадком 5 для подачі газу. До нижнього і верхнього відсіків циліндричної ємності підстиковані п'езометри 6 і 7 відповідно, та штуцер заправки/зливу 8. П'езометри 6, 7 і ємність 1 з'єднані через вентиль 9 зі стендовою магістраллю відведення парів робочої рідини.

Для фіксації рівнів у п'езометрах та появи бульбашок газу над СРФ використовувалися дві відеокамери.

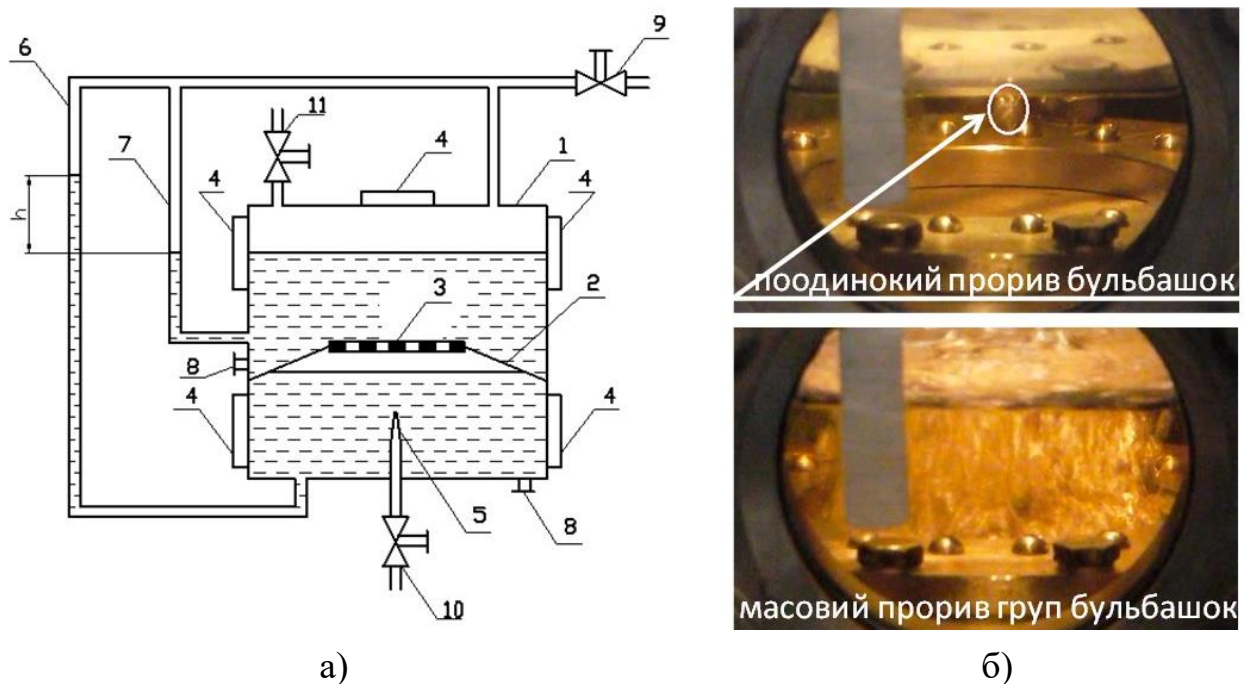


Рис. 3.1. Схема дослідної установки визначення КУЗ СРФ (а) та фотографії ЕВ з фіксацією поодинокого прориву бульбашок газу і масового прориву групи бульбашок крізь чарунки сітки (б): 1 – циліндрична ємність; 2 – перегородка; 3 – СРФ; 4 – ілюмінатор; 5 – штуцер з каліброваним насадком; 6, 7 – п'езометри; 8 – штуцер заправки/зливу; 9 – вентиль для відведення парів КП; 10 – вентиль дозованої подачі газу; 11 – вентиль наддуву верхнього відсіку; 12 – відеокамери

Схема кріплення СРФ у дослідну установку наведено на Рис. 3.2 і 3.3.

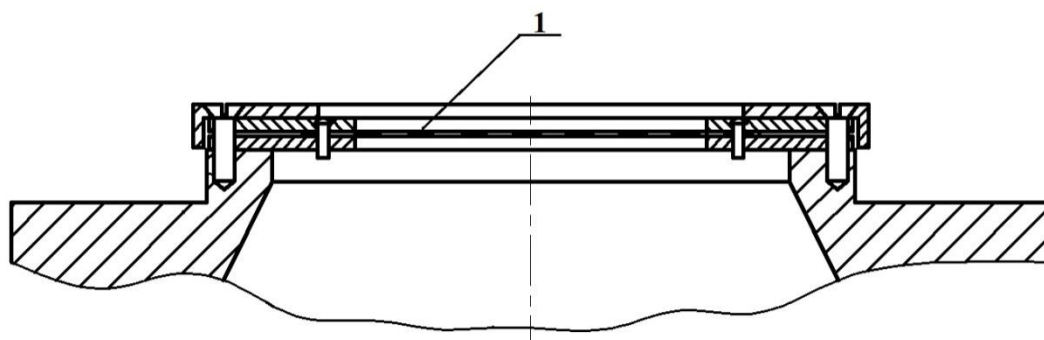


Рис. 3.2. Схема кріплення СРФ 1 і 2 у дослідну установку: 1 – сітка № 008

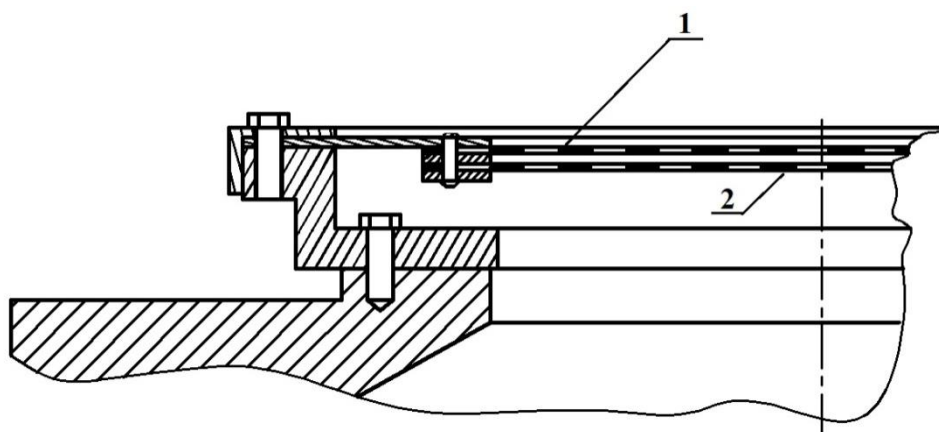


Рис. 3.3. Схема кріплення пакетного СРФ 3 у дослідну установку: 1 – сітка №008; 2 – сітка № 008

У якості робочих рідин при ЕВ було використано: АТ (аміл) ГОСТ В 17656-72 і НДМГ (гептил) ГОСТ В 17803-72, що були ідентичні КП, які штатно заправляються в паливні системи КЛА. У якості газу наддуву було використано – азот ОСТ 92-1577-78, другої категорії.

3.2. Послідовність проведення експериментальних випробувань по визначенню капілярної утримуючої здатності

Випробування проводились у наступній послідовності [195, 208, 209, 212]. СРФ 3, що випробовується, монтувався на фланець перегородки 2. Ємність 1 через штуцер 8 заправлялася робочою рідиною до середини висоти ілюмінатора верхнього відсіку.

При заправці вентиль 9 відкритий, рідина в п'езометрах 6, 7 та ємності 1 знаходилася на одному рівні.

Через відкритий вентиль 10 і калібрований насадок 5 під СРФ, малими порціями, подавався газ. Рідина, що витіснялася з-під СРФ, перетікала у верхній відсік і п'езометри 6 і 7, рівні в яких синхронно підвищувалися до моменту перекриття газом всієї нижньої поверхні СРФ. ПРФ «рідина – газ», що утворювалася на СРФ за рахунок капілярних сил, перешкоджала проникненню газу у верхній відсік, в результаті чого під СРФ накопичувався газ. Після перекриття газом усієї площі СРФ починалося підвищення тиску в нижньому відсіку і зростання рівня рідини тільки в п'езометрі 6. Тиск над СРФ залишався постійним і рівним тиску стовпа рідини у верхньому відсіку.

Зростання тиску під СРФ тривало до тих пір, поки він не перевищував капілярний тиск в менісках ПРФ чарунок сітки. При цьому відбувалося руйнування ПРФ і крізь СРФ проривалися бульбашки газу. Оскільки капілярний тиск у чарунці залежить від її геометричних параметрів, то перші одиночні прориви газу мали місце в найбільших чарунках, а подальше зростання тиску викликало масовий прорив газу у цілих групах чарунок.

Прорив газу скрізь чарунки сітки СРФ спостерігався крізь ілюмінатори верхнього відсіку. Одночасно фіксувалась різниця рівнів рідини h у п'езометрах, яка характеризувала капілярний тиск у чарунках сітки СРФ і вимірювалась у міліметрах стовпа КП.

Весь час між випробуваннями СРФ знаходився у робочій рідині. Злив робочої рідини відбувався крізь штуцер 8.

Наявність газу наддування під сіткою призводить до того, що рівень КП у нижньому відсіку знаходиться нижче сітки СРФ. Внаслідок цього реальна різниця рівнів була більшою за ту, що фіксується п'езометрами. Для компенсації цього після кожної фіксації масового прориву вентиль 9 закривався, верхній відсік наддувався газом до тиску $P_{зниж.}$ через вентиль 11 і фіксувалося зниження рівня рідини у верхньому відсіку, що у таблицях результатів випробувань зазначається як Δh_p . Згідно тарування верхнього відсіку визначався об'єм стиснення, а далі, враховуючи тиск навантаження, розраховувався об'єм газової порожнини. Оскільки було потрібно визначити значення газового об'єму безпосередньо під сіткою, отримана величина зменшувалась на об'єм трубопроводу постачання газу у нижній відсік, який для АТ дорівнював 16 см^3 , а для НДМГ – $6,5 \text{ см}^3$. Після цього, використовуючи тарування порожнини під сіткою, визначалося зниження рівня рідини під сіткою, яке додавалося до різниці рівнів у п'езометрах – h_c .

Еталонні дані було отримано для контрольних зразків СРФ, які було виготовлено за штатною технологією, з того ж самого рулону сітки. Випробування еталонних СРФ проводилися за тією ж самою методикою.

Іспити проводилися в день монтування СРФ при температурах робочої рідини: $(5\pm 2)^\circ\text{C}$; $(10\pm 2)^\circ\text{C}$; $(15\pm 2)^\circ\text{C}$, та після 7 тижнів витримки в КП СРФ, що підлягають іспиту при однієї з вказаних температур. У випадку розходження отриманих результатів більш ніж на 5 % – проводилися іспити при всіх значеннях температури.

Кількість залікових випробувань для СРФ при кожній з трьох вказаних значень температур робочої рідини – не менш трьох.

Перелік параметрів, що вимірювалися під час іспитів наведено у Таблиці 3.2.

Перелік параметрів, що вимірювалися під час іспитів

Параметр	Діапазон (або номінальне значення параметру)	Допустима похибка вимірів	Засоби вимірювання	
			Первинний перетворювач	Регістратор
Встановлення виробу у вертикальне положення, кут. мін.	0	не більш 15'	КО-1	візуально
Різниця рівній у п'єзометрах, мм	0-100	±1	п'єзометр, відеокамера	візуально
Температура робочої рідини, °С: а) аміл б) гептил	5-15 5-15	±1	термометр опору ТП-085	ЕПП
Процес прориву газу	---	---	відеокамера	візуально
Розмір елементів сітки, мкм	40-110	±2	---	візуально
Тиск в ємності, кгс/см ²	0-1	±0,5	манометр	візуально

В цілому для випробувань використовувалося 55 зразків сіток (включаючи еталонні), що перебували в рідкій фазі КП (АТ і НДМГ) і під їх парами. Для них проведено:

- 384 випробування з визначення КУЗ СРФ на АТ;
- 349 випробувань з визначення КУЗ СРФ на НДМГ.

3.3 Результати експериментальних випробувань з визначення капілярної утримуючої здатності сітчастих розділювачів фаз

У Таблицях 3.3 – 3.6 наведено результати визначення контрольних значень КУЗ СРФ виготовлених з нових сіток №008, а у Таблицях 1 – 17 додатку В наведено результати визначення КУЗ демонтованих СРФ, що тривалий термін перебували в рідкій фазі КП (АТ і НДМГ) і під їх парами.

Таблиця 3.3

Результати визначення контрольних значень КУЗ СРФ, виготовлених з нових сіток №008 на АТ (еталонний КЗ № 1)

№ іспиту	Температура, °С	Показники п'єзометрів, мм						Висота газового об'єму під сіткою, мм			КУЗ, мм ст. роб. рід.	
		Одиночний прорив			Масовий прорив			$P_{зниз.}$, кгс/см ²	Δh_p , мм	h_c , мм	одиночний прорив	масовий прорив
		під сіткою	над сіткою	різниця	під сіткою	над сіткою	різниця					
Еталонний СРФ виготовлений з нової сітки №008 (іспити в день монтажу)												
1	3-6	125	71	54	124	71	53	1	2	16,3	70,3	69,3
2		124	71	53	122	71	51	1	2	16,3	69,3	67,3
3		124	71	53	122	71	51	1	2	16,3	69,3	67,3
1	7-11	120	71	49	118	71	47	1,2	2,5	19,5	68,5	66,5
2		121	71	50	118	71	47	1,2	2,5	19,5	69,5	66,5
3		121	71	50	119	71	48	1,2	2,5	19,5	69,5	66,5
1	14-15	112	75	37	109	75	34	1,2	4	26,5	63,5	60,5
2		113	75	38	111	75	36	1,2	4	26,5	64,5	62,5
3		113	75	38	110	75	35	1,2	4	26,5	64,5	61,5
Еталонний СРФ виготовлений з нової сітки №008 (іспити після 7 тижнів витримки у КП)												
1	13-15,5	120	71	49	116	71	45	1	2	16,3	65,3	61,3
2		120	70	50	114	71	43	1	2	16,3	66,3	59,3
3		121	71	50	117	70	47	1	2	16,3	66,3	63,3

Таблиця 3.4

Результати визначення контрольних значень КУЗ СРФ виготовлених з нових сіток №008 на НДМГ (еталонний КЗ № 1)

№ іспиту	Температура, °С	Показники п'єзометрів, мм						Висота газового об'єму під сіткою, мм			КУЗ, мм ст. роб. рід.	
		Одиночний прорив			Масовий прорив			$P_{зниз.}$, кгс/см ²	Δh_p , мм	h_c , мм	одиночний прорив	масовий прорив
		під сіткою	над сіткою	різниця	під сіткою	над сіткою	різниця					
Еталонний СРФ виготовлений з нової сітки №008 (іспити в день монтажу)												
1	4,5-5	117	28	89	112	28	84	---	---	---	---	---
2		120	28	92	113	28	85	---	---	---	---	---
3		120	28	92	113	28	85	---	---	---	---	---

1	9,5-10,7	116	29	87	113	29	84	---	---	---	---	---
2		117	29	88	111	29	82	---	---	---	---	---
3		116	29	87	111	29	82	---	---	---	---	---
1	13-14,7	114	31	83	112	31	81	---	---	---	---	---
2		114	31	83	112	31	81	---	---	---	---	---
3		114	31	83	111	31	80	---	---	---	---	---
Еталонний СРФ виготовлений з нової сітки №008 (іспити після 7 тижнів витримки у КП)												
1	12	94	13	81	88	13	75	1	5	33	114	108
2		91	13	78	89	13	76	1	5	33	111	109
3		93	13	80	88	13	75	1	5	33	113	108

Таблиця 3.5

Результати визначення контрольних значень КУЗ СРФ виготовлених з нових сіток №008 на АТ (еталонний КЗ № 2)

№ іспиту	Температура, 0С	Показники п'єзометрів, мм						Висота газового об'єму під сіткою, мм		КУЗ, мм ст. роб. рід.		
		Одиночний прорив			Масовий прорив			Δh_p , мм	h_z , мм	одиночний прорив	масовий прорив	
		під сіткою	над сіткою	різниця	під сіткою	над сіткою	різниця					
Еталонний СРФ виготовлений з нової сітки №008 (іспити в день монтажу)												
1	6	55	30	25	59	30	29	8	38	63	67	
2	6	---	---	---	75	20	55	2,5	20	---	75	
3	6	---	---	---	60	20	40	4	26	---	66	
1	10,5	55	20	35	64	20	44	3,5	26	61	70	
2	11,5	---	---	---	44	24	20	3,5	27	---	47	
3	12	---	---	---	49	21	28	4	29	---	57	
1	14,5	---	---	---	34	0	34	4,5	31	---	65	
2	15	---	---	---	69	21	48	3	25	---	73	
3	15	69	20	49	48	25	23	3,5	30	79	53	
Еталонний СРФ виготовлений з нової сітки №008 (іспити після 7 тижнів витримки у КП)												
1	5	---	---	---	54	21	33	3	24	---	57	
2	6	---	---	---	75	19	56	2	18	---	74	
3	7	---	---	---	68	19	49	2	18	---	67	
1	10,5	---	---	---	64	22	42	3,5	27	---	69	
2	11,5	---	---	---	83	20	63	1	10	---	73	
3	12	---	---	---	83	20	63	2	18	---	81	

1	15,5	---	---	---	63	20	43	2	20	---	63
2	16	---	---	---	63	20	43	1,5	17	---	60
3	16	---	---	---	69	22	47	2	18	---	65

Таблиця 3.6

Результати визначення контрольних значень КУЗ СРФ виготовлених з нових сіток №008 на НДМГ (еталонний КЗ № 2)

№ іспиту	Температура, 0С	Показники п'єзометрів, мм						Висота газowego об'єму під сіткою, мм		КУЗ, мм ст. роб. рід.	
		Одиночний прорив			Масовий прорив			Δh_p , мм	h_c , мм	одиночний прорив	масовий прорив
		під сіткою	над сіткою	різниця	під сіткою	над сіткою	різниця				
Еталонний СРФ виготовлений з нової сітки №008 (іспити в день монтажу)											
1	5	---	---	---	135	36	99	1,5	17	---	116
2	5	90	35	55	139	35	104	0,5	7	55	111
3	5	134	35	99	135	35	100	2	21	99	121
1	10	139	37	102	139	37	102	0,5	7	102	109
2	10	80	37	43	130	37	93	1,5	18	43	111
1	14	110	33	77	135	38	97	1	13	---	110
2	15	130	39	91	130	39	91	1	13	91	104
3	15	130	39	91	134	39	95	1	13	91	108
Еталонний СРФ виготовлений з нової сітки №008 (іспити після 7 тижнів витримки у КП)											
1	4	100	33	67	125	33	92	1,5	15,7	67	108
2	4,5	108	33	75	130	34	96	1,5	15,7	75	112
3	4,5	125	34	91	140	34	106	1,5	16,6	91	122

3.4 Аналіз результатів експериментальних випробувань з визначення капілярної утримуючої здатності сітчастих розділювачів фаз

Оскільки конструкція капілярних ЗЗС палива повинна запобігати потраплянню поодиноких бульбашок до входу у РУ, подальше визначення зміни КУЗ, у залежності від терміну їх експлуатації, проведено відповідно до отриманих експериментальних значень порушення КУЗ внаслідок масового прориву газової фази скрізь чарунки сітки.

Отриманий у результаті проведення випробувань масив експериментальних даних (Таблиці 3.3 – 3.6 і Таблиці 1 – 17 додатку В) для сіток

СРФ АТ і НДМГ, які перебували в рідкій фазі КП і під парами, апроксимували за допомогою лінійної функції [195, 208, 209, 212]. Параметри лінійної залежності визначалися за методом найменших квадратів згідно з формулами (2.5) – (2.7).

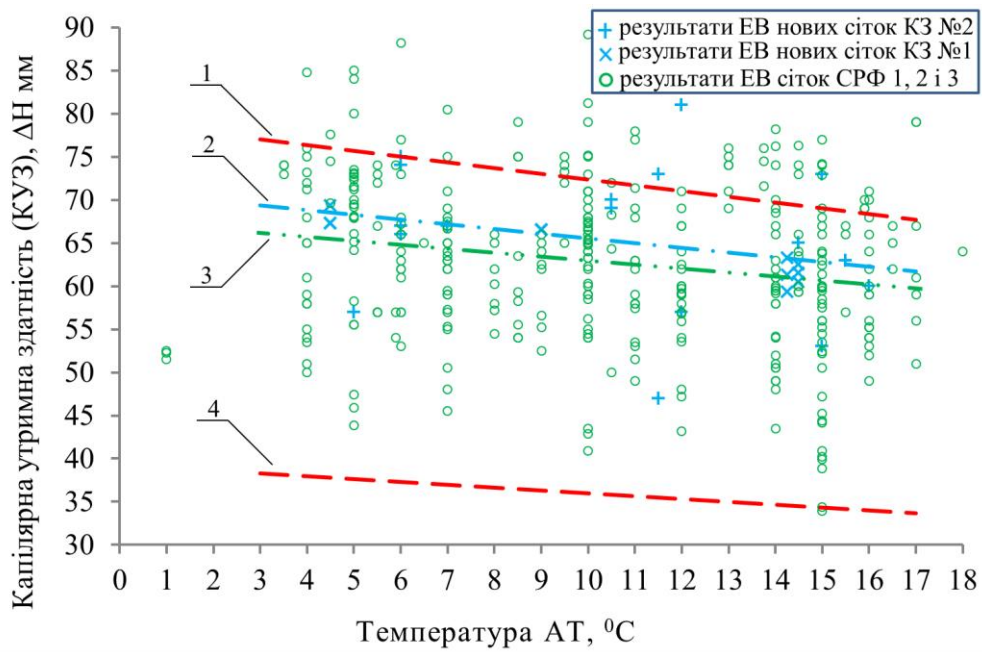
На Рис. 3.4 наведено результати експериментального визначення залежності зміни КУЗ від температури для еталонних СРФ виготовлених з нових сіток №008 (еталонного КЗ №1 і №2) та сіток СРФ 1, 2 і 3, що тривалий час (згідно з даними таблиці 3.1) перебували в рідкій фазі КП (АТ та НДМГ) і під парами, порівняно з межами допусків за ТУ.

Як видно з Рис. 3.4а і б, внаслідок тривалого перебування сіток СРФ в рідкій фазі КП і під парами відбулося зниження КУЗ. Характер зміни КУЗ, залежно від зміни температури – ідентичні отриманим для еталонних (нових) сіток. Це підтверджує достовірність отриманих результатів і дає можливість в подальшому, використовувати у розрахунках середні за температурою значення КУЗ при розрахунках.

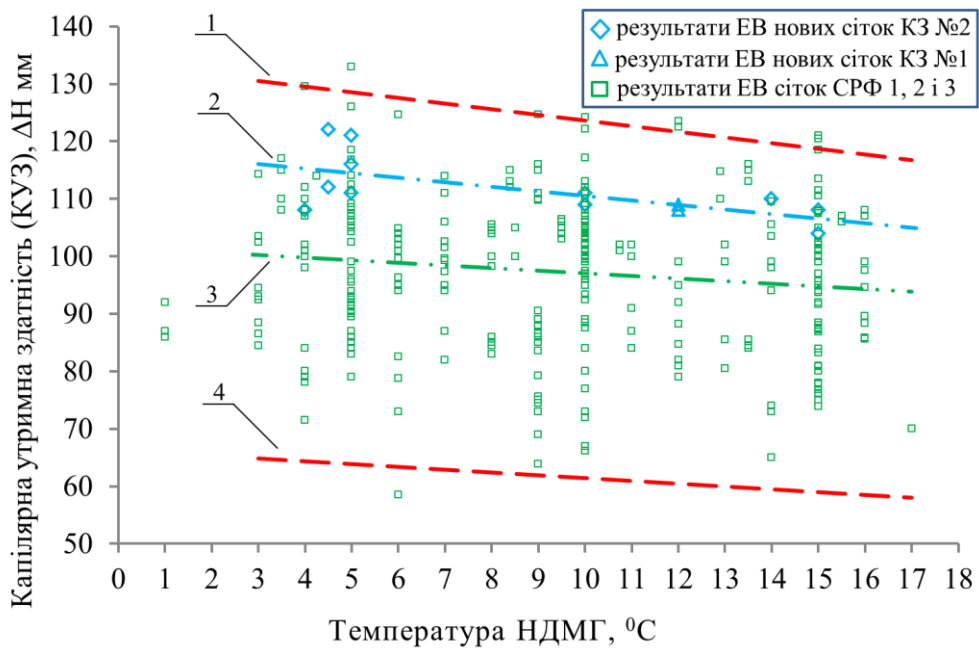
Для СРФ, які тривалий час перебували в рідкій фазі АТ і під парами: мінімальні значення КУЗ перебувають на нижній межі розрахованого допуску, відповідно до даних за допустимими відхиленнями геометричних параметрів сітки №008, згідно до ТУ (Рис. 3.4а, пряма 4); максимальні значення КУЗ, так само, як і для еталонних сіток перевищують верхню межу розрахованого допуску, згідно з даними, щодо допустимих відхилень геометричних параметрів сітки №008, згідно до ТУ (Рис. 3.4а, пряма 1).

Для СРФ, які тривалий час перебували в рідкій фазі НДМГ і під парами: мінімальні значення КУЗ перебувають на нижній межі розрахованого допуску, відповідно до даних за допустимими відхиленнями геометричних параметрів сітки №008, згідно до ТУ (Рис. 3.4б, пряма 4); максимальні значення КУЗ перебувають на верхній межі розрахованого допуску, відповідно до даних, щодо допустимих відхилень геометричних параметрів сітки №008 згідно до ТУ (Рис. 3.4б, пряма 1).

На Рис. 3.5 – 3.8 наведено графіки залежності зміни КУЗ від температури для зразків сіток СРФ 1, 2 і 3, які тривалий час перебували в рідкій фазі і під парами КП АТ та НДМГ.

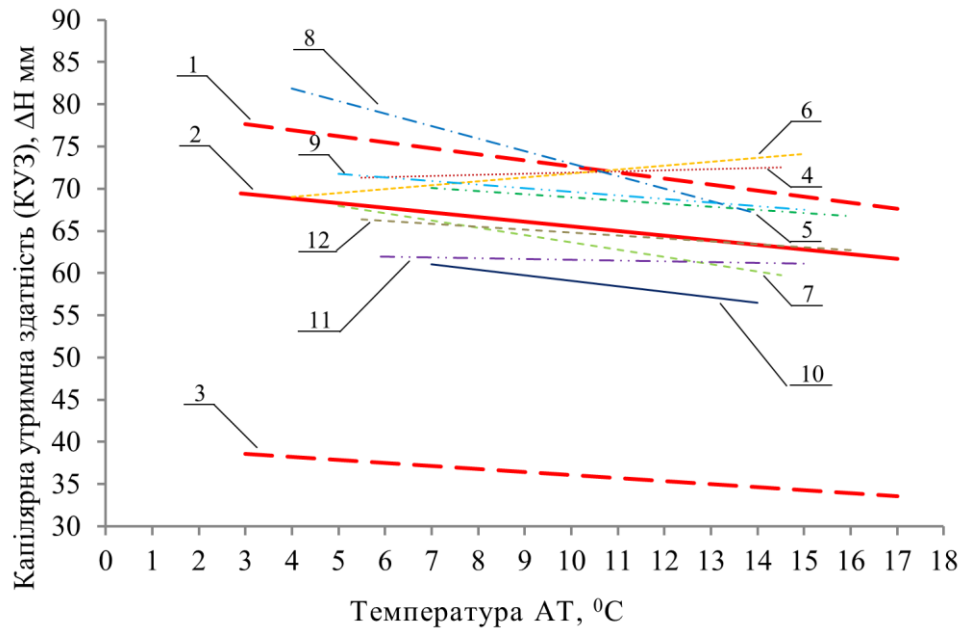


а)

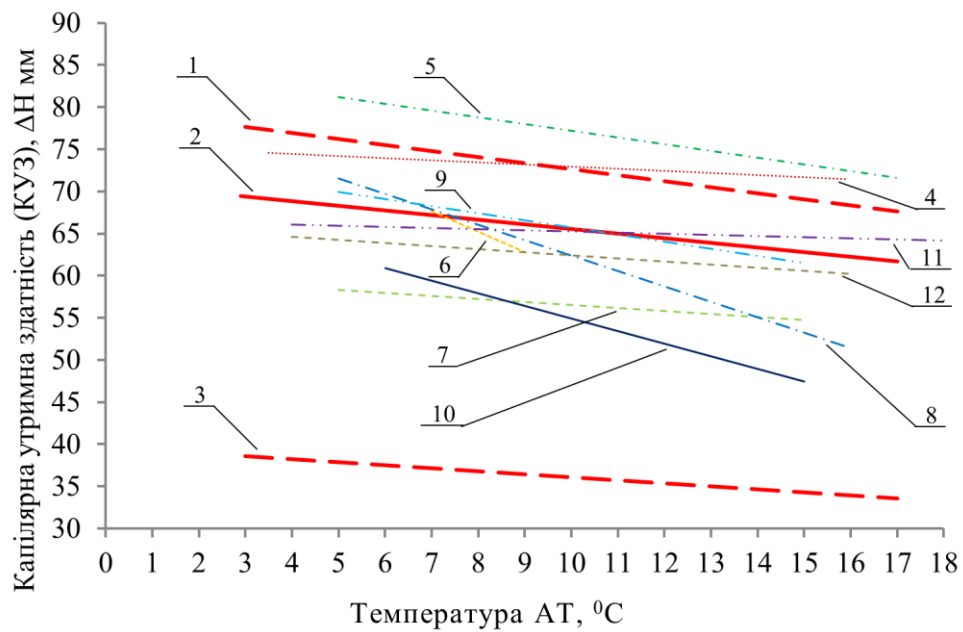


б)

Рис. 3.4. Графік залежності зміни КУЗ від температури для еталонних СРФ виготовлених з нових сіток №008 у АТ і НДМГ, порівняно з розрахунковим номінальним значенням і межами допусків за ТУ: а) – для АТ; б) – для НДМГ; 1 – верхня межа допуску за ТУ (80 мкм -13%); 2 – апроксимація сумісних результатів випробувань еталонних (нових) зразків сіток КЗ №1 і №2; 3 – апроксимація сумісних результатів випробувань сіток СРФ 1, 2 і 3; 4 – нижня межа допуску за ТУ (80 мкм +75%)



а)



б)

Рис. 3.5. Графік залежності зміни КУЗ зразків сіток СРФ 1 і 2 від температури після їх тривалого перебування в рідкій фазі КП АТ: а) – рідка фаза АТ СРФ 1; б) – рідка фаза АТ СРФ 2; 1 – верхня межа допуску за ТУ (80 мкм -13%); 2 – апроксимація результатів випробувань еталонних (нових) зразків сіток; 3 – нижня межа допуску за ТУ (80 мкм +75%); апроксимація результатів випробувань СРФ: 4 – КЗ №8; 5 – КЗ №9; 6 – КЗ №10; 7 – КЗ №11; 8 – КЗ №12; 9 – КЗ №13; 10 – КЗ №14; 11 – КЗ №15; 12 – КЗ №16

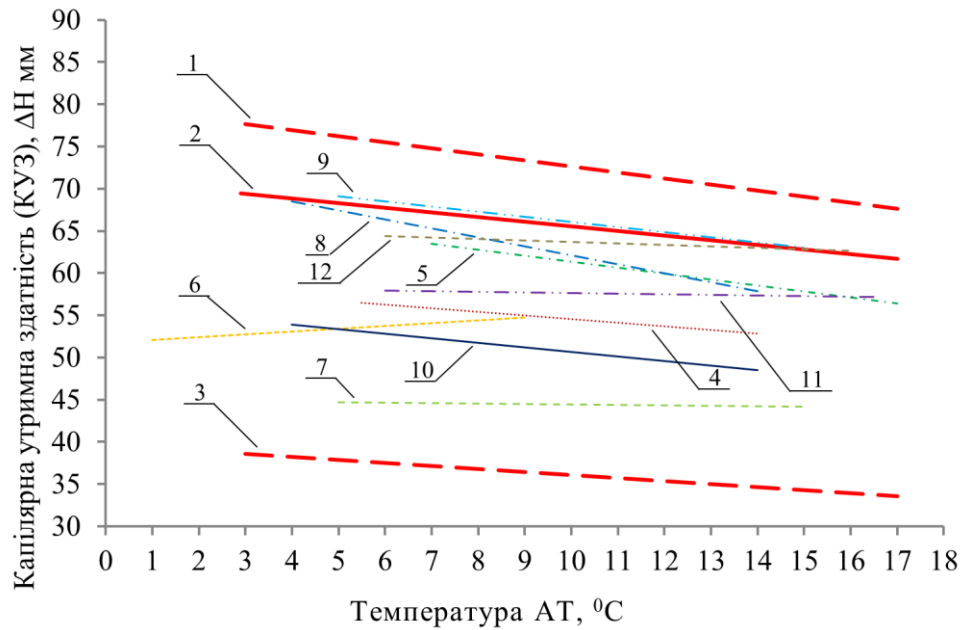


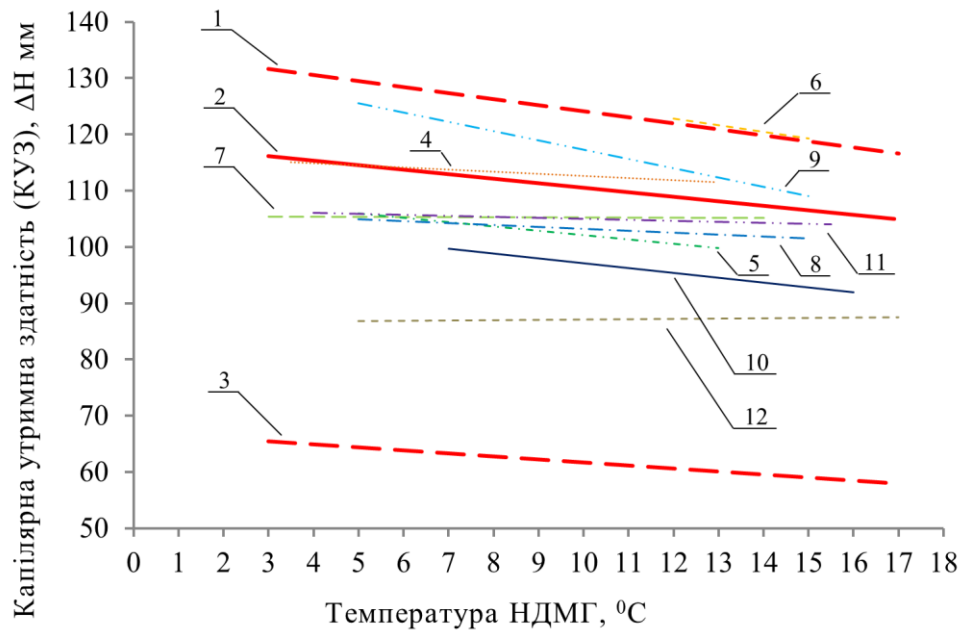
Рис. 3.6. Графік залежності зміни КУЗ зразків сіток СРФ 3 від температури після їх тривалого перебування під парами КП АТ: 1 – верхня межа допуску за ТУ (80 мкм -13%); 2 – апроксимація результатів випробувань еталонних (нових) зразків сіток; 3 – нижня межа допуску за ТУ (80 мкм +75%); апроксимація результатів випробувань СРФ: 4 – КЗ №8; 5 – КЗ №9; 6 – КЗ №10; 7 – КЗ №11; 8 – КЗ №12; 9 – КЗ №13; 10 – КЗ №14; 11 – КЗ №15; 12 – КЗ №16

Як видно з Рис. 3.5а і б і 3.6. внаслідок тривалого терміну перебування СРФ у рідкій фазі і під парами КП АТ:

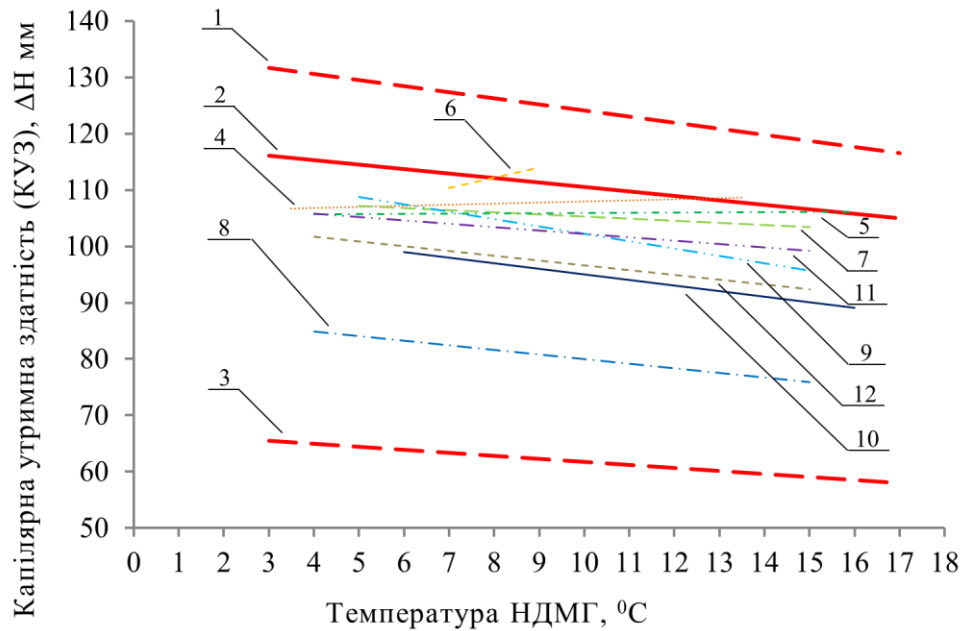
- мінімальні середньо-апроксимовані значення КУЗ не перетинають нижню межу допуску за ТУ;

- максимальні середньо-апроксимовані значення КУЗ перетинають верхню межу допуску за ТУ (Рис. 3.5а пряма 1) для СРФ 1 прями 4, 6 і 8 (КЗ № 8, 10 і 12: 14 років, 15 років і 2 місяці, 17 років і 5 місяців знаходження СРФ в рідкій фазі КП, відповідно), відповідно як і окремі значення КУЗ для еталонних сіток (Рис. 3.4а);

- суммарне середнє значення КУЗ СРФ перевищує результати випробувань еталонних (нових) зразків сіток: для СРФ АТ 1 на 2,9 %, для СРФ АТ 2 воно нижче на 2 %, а для СРФ АТ 3 є нижчим на 12,9 %.



а)



б)

Рис. 3.7. Графік залежності зміни КУЗ зразків сіток СРФ 1 і 2 від температури після їх тривалого перебування в рідкій фазі КП НДМГ: а) – рідка фаза НДМГ СРФ 1; б) – рідка фаза НДМГ СРФ 2; 1 – верхня межа допуску за ТУ (80 мкм -13%); 2 – апроксимація результатів випробувань еталонних (нових) зразків сіток; 3 – нижня межа допуску за ТУ (80 мкм +75%); апроксимація результатів випробувань СРФ: 4 – КЗ №8; 5 – КЗ №9; 6 – КЗ №10; 7 – КЗ №11; 8 – КЗ №12; 9 – КЗ №13; 10 – КЗ №14; 11 – КЗ №15; 12 – КЗ №16

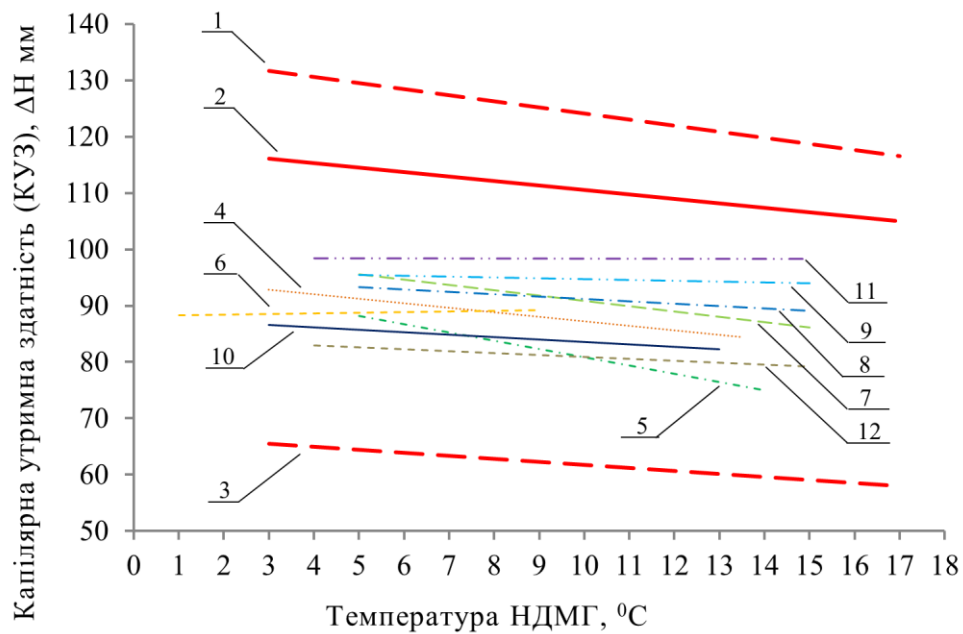


Рис. 3.8. Графік залежності зміни КУЗ зразків сіток СРФ 3 від температури після їх тривалого перебування під парами КП НДМГ: 1 – верхня межа допуску за ТУ (80 мкм -13%); 2 – апроксимація результатів випробувань еталонних (нових) зразків сіток; 3 – нижня межа допуску за ТУ (80 мкм +75%); апроксимація результатів випробувань СРФ: 4 – КЗ №8; 5 – КЗ №9; 6 – КЗ №10; 7 – КЗ №11; 8 – КЗ №12; 9 – КЗ №13; 10 – КЗ №14; 11 – КЗ №15; 12 – КЗ №16

Як видно з Рис. 3.7а і б і 3.8, внаслідок тривалого терміну перебування СРФ у рідкій фазі і під парами КП НДМГ:

- мінімальні середньо-апроксимовані значення КУЗ не перетинають нижню межу допуску за ТУ;
- максимальні середньо-апроксимовані значення КУЗ не перевищують верхню межу допуску за ТУ;
- сумарне середнє значення КУЗ СРФ менше за результати випробувань еталонних (нових) зразків сіток: для СРФ НДМГ 1 на 5,9%, для СРФ НДМГ 2 на 11,2 % та для СРФ НДМГ 3 на 21 %.

Для більш практичного використання отриманих даних доцільно застосування методів теорії подібності відносно зміни КУЗ сіток СРФ відповідно до терміну їх експлуатації.

Оскільки прорив газу під сітку СРФ у статичних умовах визначається співвідношенням сил, що діють на рідину – капілярних і гідростатичних. Для характеристики процесів, що відбуваються під впливом цих сил в гідромеханіці використовують безрозмірний комплекс – число Бонда (Bo).

Відповідно до теорії подібності, для всякої сукупності явищ всі безрозмірні комплекси мають однакові чисельні значення [214]. Таким чином для геометрично подібних конструкцій СРФ (що мають однаковий тип плетіння і форму перерізу дроту) процес прориву газу відбувається за цілком визначеним та постійним значенням числа $Bo = Bo_{кр}$ (має назву критичного числа Бонда).

Загальний вираз для визначення граничної висоти стовпа рідини, що утримує сітка СРФ має вигляд [1, 12, 76, 215]:

$$\Delta H = \frac{Bo_{кр} \cdot \sigma}{\rho \cdot a \cdot b_{чар}} \cdot \cos \theta , \quad (3.1)$$

де $Bo_{кр}$ – критичне число Бонда; σ – коефіцієнт поверхневого натягу КП; ρ – густина КП; a – поздовжнє прискорення; $b_{чар}$ – розмір чарунки сітки; θ – контактний кут змочування КП з конструкційним матеріалом сітки, який у номінальних умовах для палив, що розглядаються, приймається рівним нулю.

$Bo_{кр}$ з рівняння (3.1) – є постійною величиною, що не залежить від фізичних властивостей рідини, перевантаження і розміру чарунок сітки. Для кожного типу конструкції СРФ вона визначається за результатами експериментальних випробувань.

Для сіток СРФ з квадратною чарункою у світлі, які перебувають під дією прискорення, $Vo_{кр}$ визначається згідно з формулою (1.16) [12]. Більш точне визначення $Vo_{кр}$ суттєво впливає на оптимальність закладених параметрів СРФ при проектуванні капілярних ЗЗС палива, і можливе лише за даними експериментального відпрацювання конкретної сітки та КП [1].

Для уточнення залежності (1.16) $Vo_{кр}$, при якому порушується рівновага зовнішніх та внутрішніх сил на ПРФ капіляру в чарунці сітки у статичних умовах, дані наведені у [12] було доповнено результатами експериментальних досліджень КУЗ для еталонних (нових) зразків сіток на КП АТ і НДМГ (Таблиці 3.3 – 3.6), а також даними які були отримані при проектуванні капілярних ЗЗС палива для РРБ РН «Циклон-4», та інших науково дослідних роботах [86, 216, 217].

На Рис. 3.9 наведена залежність $Vo_{кр}$ від температури рідини для сіток з квадратною чарункою у світлі: 40, 80, 140 і 400 мкм; та робочих рідин: АТ, НДМГ, хлору, спирту, води і керосину Т1.

Відповідно до Рис. 3.9 отримано нову, уточнену залежність осередненого значення $Vo_{кр}$ від температури КП (для $\theta = 0$), яка дорівнює [195]:

$$Vo_{кр} = 2,72 - 0,012 \cdot T. \quad (3.2)$$

За допомогою визначеного у рівнянні (3.2) значення $Vo_{кр}$ (для нових сіток СРФ), яке при температурі КП 10 °С буде дорівнювати $Vo_{кр} = 2,6$ побудовано графіки лінійної регресії зміни апроксимованих значень КУЗ СРФ АТ і НДМГ 1, 2 і 3 за часом, відносно максимальних швидкостей корозійного враження дротів сіток СРФ, що були визначені у розділі 2.

На Рис. 3.10 і 3.11 наведено графіки лінійної регресія зміни апроксимованих значень КУЗ СРФ АТ і НДМГ 1, 2 за часом.

На Рис. 3.12 наведено графіки лінійної регресії зміни апроксимованих значень КУЗ СРФ АТ і НДМГ 3 за часом.

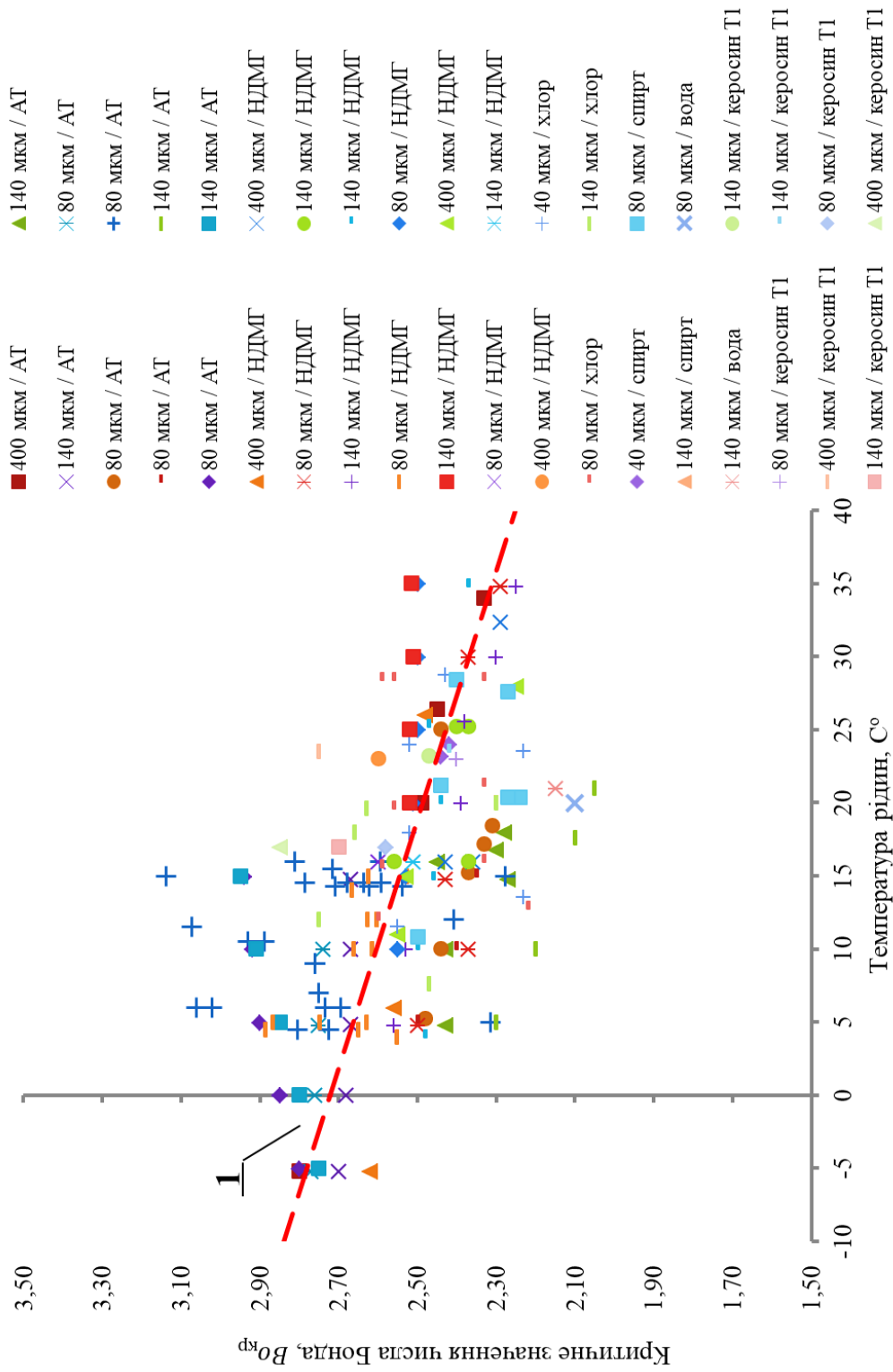


Рис. 3.9. Залежність критичного значення числа Бонду від температури рідини: 1 – апроксимаційна пряма

Данні по середнім значенням $Bo_{кр}$ за температури КП $10^{\circ}C$ і розміру чарунки $b_{чар} = 80$ мкм, в залежності від терміну експлуатації СРФ в КП АТ та НДМГ і під їх парами, наведено у Таблиці 3.7.

Таблиця 3.7

Середні значення $Bo_{кр}$ в залежності від терміну експлуатації СРФ в КП АТ та НДМГ і під їх парами (температура КП $10^{\circ}C$; розмір чарунки $b_{чар} = 80$ мкм)

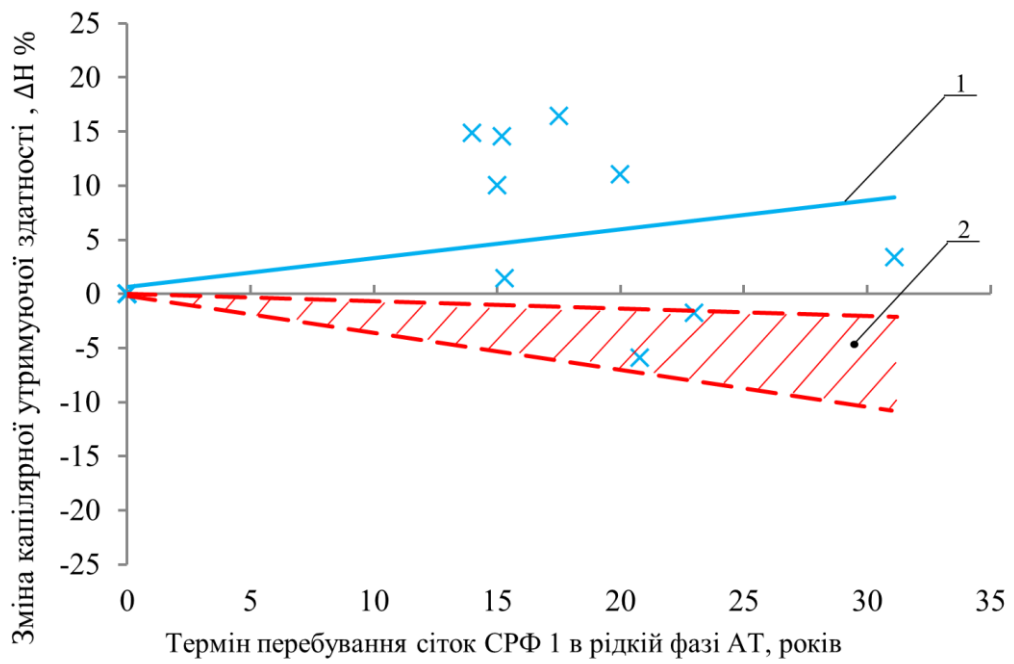
Час, роки	$Bo_{кр}$					
	АТ			НДМГ		
	СРФ 1	СРФ 2	СРФ 3	СРФ 1	СРФ 2	СРФ 3
14 р.	3,01	3,05	2,28	2,70	2,59	2,09
15 р.	2,88	3,22	2,56	2,45	2,54	1,94
15 р. 2 м.	3,00	2,60	2,30	3,00	2,78	2,14
15 р. 2 м.	2,65	2,36	1,85	2,53	2,52	2,18
17 р. 5 м.	3,05	2,53	2,59	2,48	1,92	2,19
20 р.	2,91	2,74	2,76	2,81	2,45	2,27
20 р. 8 м.	2,46	2,30	2,11	2,34	2,28	2,01
23 р.	2,57	2,73	2,40	2,52	2,45	2,36
31 р. 1 м.	2,71	2,61	2,66	2,09	2,32	1,94

Ймовірні відхилення $Bo_{кр}$ від номінального значення, визначаються виходячи із розсіювання складових, що вимірюються, за формулою [218]:

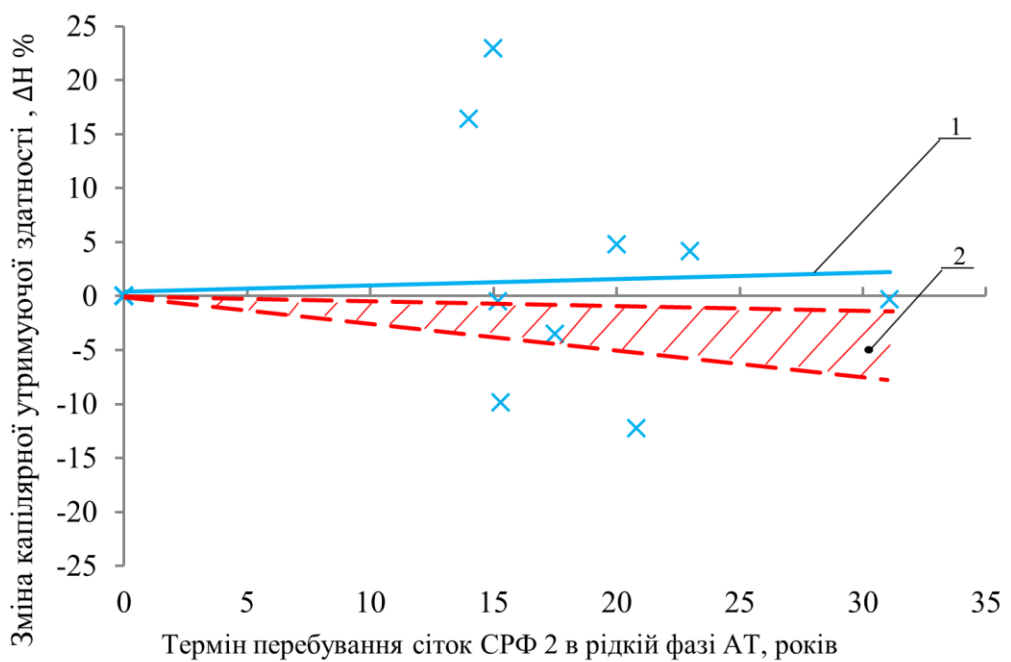
$$\frac{\delta Bo_{кр}}{Bo_{кр}} = \pm \sqrt{\left(\frac{\delta b_{чар}}{b_{чар}}\right)^2 + \left(\frac{\delta \Delta H}{\Delta H}\right)^2 + \left(\frac{\delta T}{T}\right)^2 + \left(\frac{\delta \sigma}{\sigma}\right)^2}, \quad (3.3)$$

де δ – відхилення величини від середнього значення; $\frac{\delta b_{чар}}{b_{чар}} = 13\%$ – відносна похибка розмірів чарунок; $\frac{\delta \Delta H}{\Delta H} = 2\%$, $\frac{\delta T}{T} = 5\%$ – відповідно відносні похибки вимірів КУЗ і температури; $\frac{\delta \sigma}{\sigma} = 7\%$ – відносна похибка фізичної константи [218].

Таким чином, відносна похибка визначення $Bo_{кр}$ складає 16 %.

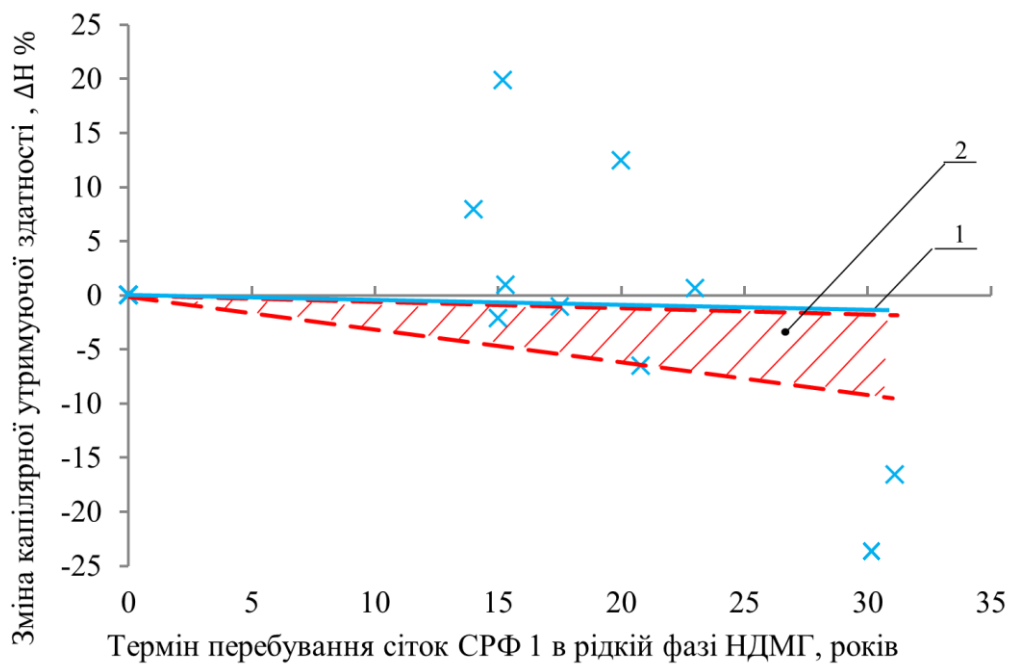


а)

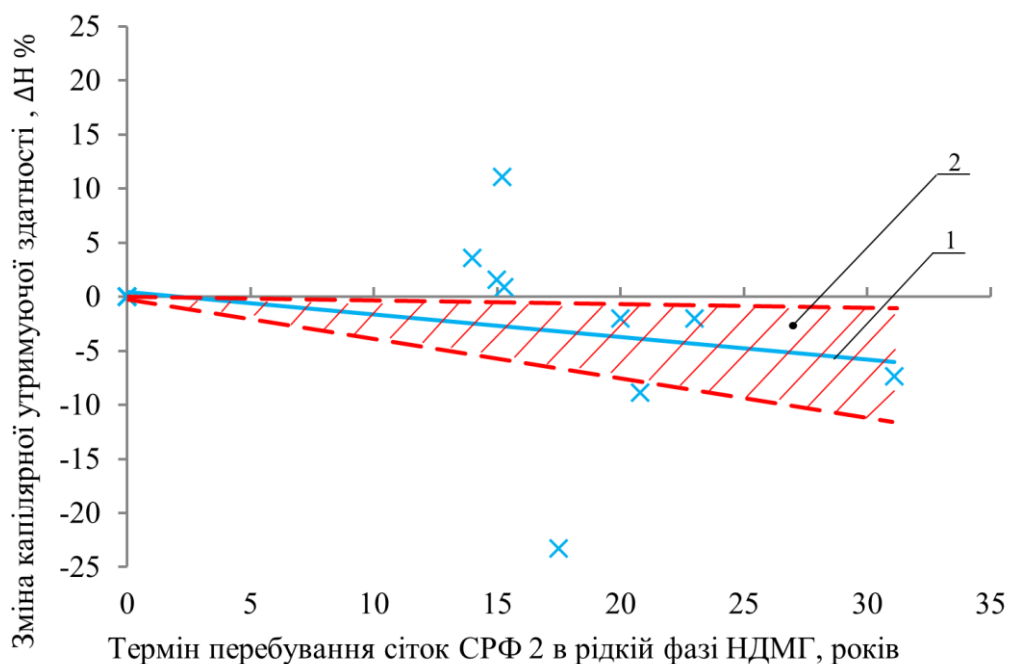


б)

Рис. 3.10. Лінійна регресія зміни апроксимованих значень КУЗ СРФ АТ 1, 2 за часом: а) – зміна КУЗ сіток СРФ 1, що перебували в рідкій фазі АТ, за часом; б) – зміна КУЗ сіток СРФ 2, що перебували в рідкій фазі АТ за часом; 1 – пряма зміни КУЗ за результатами експериментальних випробувань (ЕВ) сіток СРФ 1 і 2 ; 2 – межі зміни КУЗ за часом, внаслідок корозійних вражень дротів сіток (наведені для кожної сітки СРФ у розділі 2)

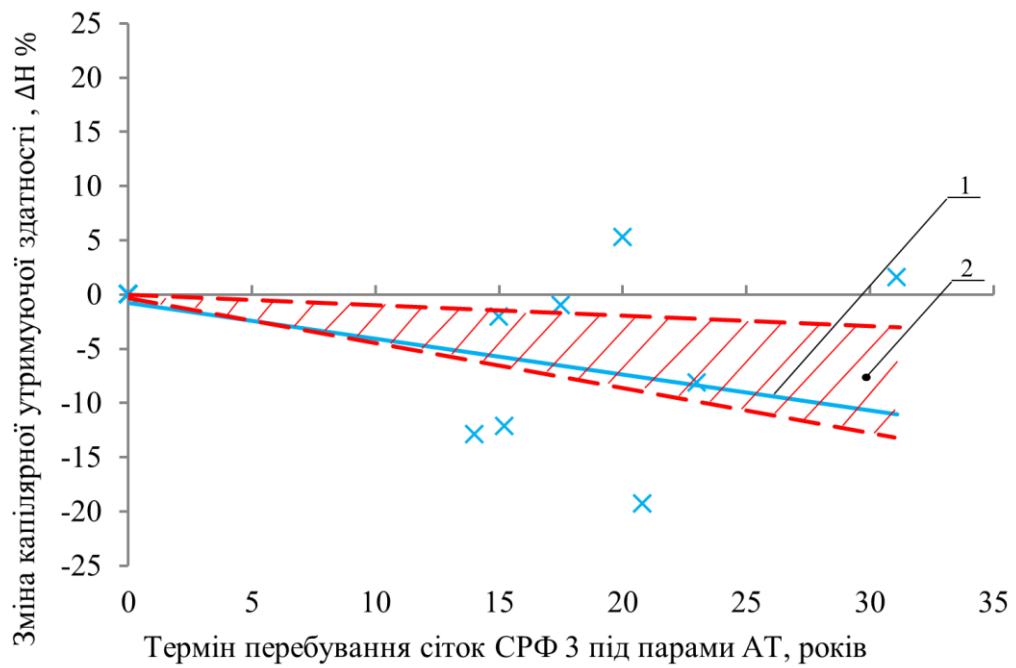


а)

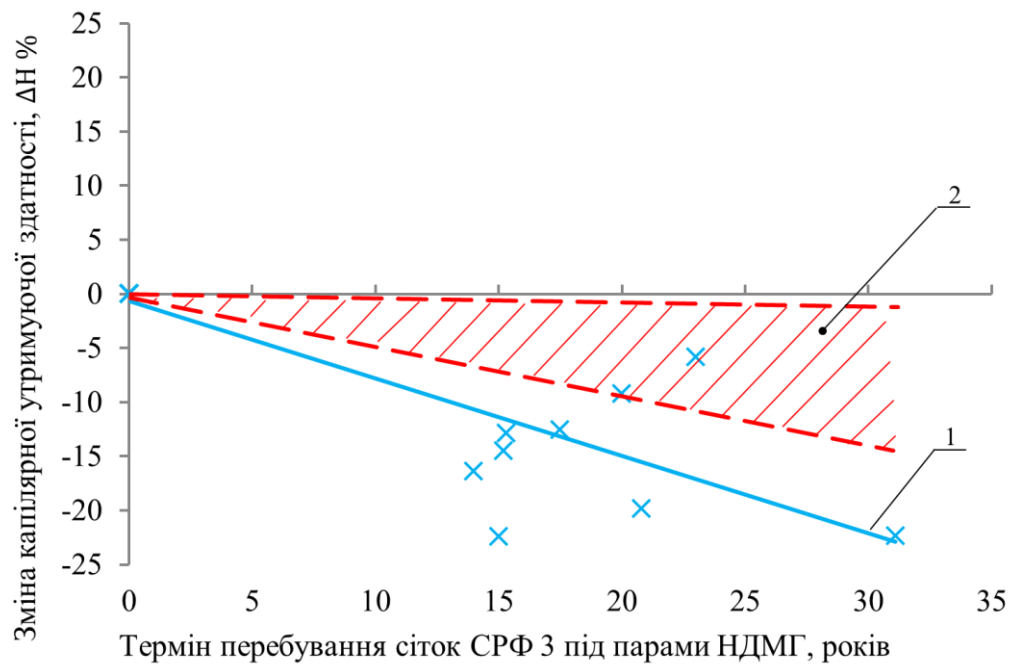


б)

Рис. 3.11. Лінійна регресія зміни апроксимованих значень КУЗ СРФ НДМГ 1, 2 за часом: а) – зміна КУЗ сіток СРФ 1, що перебували в рідкій фазі НДМГ, за часом; б) – зміна КУЗ сіток СРФ 2, що перебували в рідкій фазі НДМГ за часом; 1 – пряма зміни КУЗ за результатами експериментальних випробувань (ЕВ) сіток СРФ 1 і 2 ; 2 – межі зміни КУЗ за часом, внаслідок корозійних вражень дротів сіток (наведені для кожної сітки СРФ у розділі 2)



а)



б)

Рис. 3.12. Лінійна регресія зміни апроксимованих значень КУЗ СРФ АТ і НДМГ 3 за часом: а) – зміна КУЗ сіток СРФ 3, що перебували під парами АТ, за часом; б) – зміна КУЗ сіток СРФ 3, що перебували під парами НДМГ, за часом; 1 – пряма зміни КУЗ за результатами експериментальних випробувань (ЕВ) сіток СРФ 3 ; 2 – межі зміни КУЗ за часом, внаслідок корозійних вражень дротів сіток СРФ (наведені для кожної сітки СРФ у розділі 2)

Результати проведених досліджень свідчать, що [195, 208, 209, 212]:

- зміна КУЗ сіток СРФ АТ 1 і 2, які перебували в рідкій фазі КП, відповідно, на 11% і 3% менше за верхні межі ймовірних змін КУЗ внаслідок корозійних вражень дротів сіток при вимірному діапазоні максимальної швидкості корозії для СРФ 1 – $V_{\tau max}^* = (0,28 \dots 1,53) \cdot 10^{-4}$ мм на рік, для СРФ 2 – $V_{\tau max}^* = (0,18 \dots 1,07) \cdot 10^{-4}$ мм на рік. Причиною цього може бути те, що сітки СРФ 1 і 2 були найбільш забруднені і окрім нальоту, плям, крапель неметалевої речовини, крупинок мали в окремих чарунках сітки рудуваті пластівці, які не перевищували за розміром одиначної чарунки, також зустрічались частки з металевим блиском, розміром у 2 – 3 чарунки (розділ 2.2, Таблиця 2.3). При цьому, масштаб цих забруднень для деяких сіток досягав 50% від їх робочої площі. Забруднення сіток зменшує ЕКД і, як наслідок, підвищує КУЗ сіток СРФ, незважаючи на збільшення загального розміру чарунок в результаті корозійного враження дротів сіток. Опосередковано це підтверджується і результатами аналізу хімічного складу речовин, що знаходяться на поверхні зразків сіток СРФ 1 і 2 з баку окислювача (розділ 2.3.1).

На Рис. 3.13, як зразок, наведено фотографію зовнішнього вигляду СРФ 1 бака окислювача комплекту зразків сіток №8, після 7 днів витримки сітки в АТ і випробувань з визначення КУЗ, та її дослідження під мікроскопом.

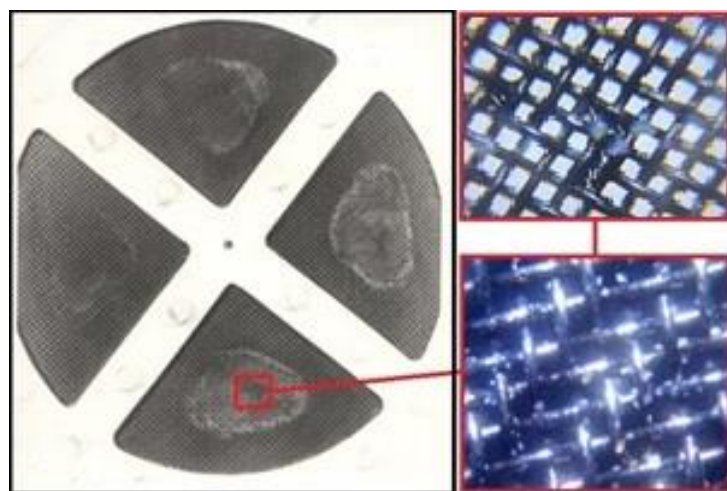


Рис. 3.13. Фотографія зовнішнього вигляду СРФ 1 бака окислювача комплекту зразків сіток №8, після 7 днів витримки сітки в АТ і випробувань з визначення КУЗ, та її дослідження під мікроскопом, при збільшенні у 320 разів

- результати експериментального визначення зміни КУЗ сіток СРФ АТ 3, які перебували під парами КП, співпадають із даними зміни КУЗ внаслідок корозійних вражень дротів сітки при виміряному діапазоні максимальної швидкості корозії: для СРФ 3 – $V_{\tau max}^* = (0,40 \dots 1,91) \cdot 10^{-4}$ мм на рік. При цьому, на 31 рік експлуатації СРФ відбудеться збільшення номінального розміру чарунки під впливом рівномірної корозії з 80 мкм до 91,8 мкм (відповідно до максимальної швидкості корозії $V_{\tau max}^* = 1,91 \cdot 10^{-4}$ мм на рік);

- результати експериментального визначення зміни КУЗ сіток СРФ НДМГ 1 і 2, які перебували в рідкій фазі КП, співпадають з даними зміни КУЗ внаслідок корозійних вражень дротів сітки при виміряному діапазоні максимальної швидкості корозії: для СРФ 1 – $V_{\tau max}^* = (0,24 \dots 1,33) \cdot 10^{-4}$ мм на рік; для СРФ 2 – $V_{\tau max}^* = (0,14 \dots 1,62) \cdot 10^{-4}$ мм на рік;

- результати експериментального визначення зміни КУЗ сіток СРФ НДМГ 3, які перебували під парами КП, відрізняються від даних щодо зміни КУЗ отриманих для сіток СРФ, що перебували в рідкій фазі відповідних КП і не співпадають з даними по зміні КУЗ внаслідок корозійних вражень дротів сітки, перевищуючи їх максимальну межу – $V_{\tau max}^* = 2,13 \cdot 10^{-4}$ мм на рік для 31 року експлуатації на ~ 8 %. Це може свідчити про вплив на КУЗ зміни значення контактного кута змочування θ для ПРФ «КП – матеріал сіток СРФ», внаслідок тривалого впливу суміші парів КП з газом наддування, та газоподібних продуктів хімічних реакцій взаємодії КП з конструкційними матеріалами паливного баку.

Виходячи з гіпотези, що значення контактного кута змочування внаслідок тривалого знаходження СРФ під парами НДМГ перестає дорівнювати нулеві [12, 127, 219], використовуючи формули (3.1) і (3.2), визначимо середнє значення контактного кута змочування на 31 рік (за температури КП 10^0 С):

а) на 31 рік експлуатації СРФ (з урахуванням збільшення номінального розміру чарунки під впливом рівномірної корозії з 80 мкм до 93,2 мкм, відповідно до $V_{\tau max}^* = 2,13 \cdot 10^{-4}$ мм на рік), згідно формул (3.1) і

(3.2) $\Delta H = 89,5$ мкм, що відповідає зменшенню КУЗ на $\sim 14,2$ % відносно номінального значення (див. Рис. 3.12, нижня межа – позначення 2);

б) за результатами експериментальних випробувань на 31 рік експлуатації СРФ зміна КУЗ досягає ~ 23 % (див. Рис. 3.12, пряма 1), що відповідає $\Delta H = 80,7$ мкм (див. Рис. 3.8, пряма 1);

в) підставляючи у формулу (3.1) значення $Bo_{кр}$, що розраховано згідно формулі (3.2), ΔH згідно (б), збільшене внаслідок корозійного впливу значення $b_{чар}$ згідно (а) та відповідні значення ρ і σ для НДМГ (за температурою $T = 10$ °С), отримаємо (для земних умов, коли $a = g = 9,81$ м/с²), що значення контактного куту змочування θ буде дорівнювати $\sim 25^\circ$.

Підвищення значень КУЗ АТ СРФ 1, 2 не є однозначно позитивним чинником, оскільки має розглядатися в рамках функціонування всієї ПГС ступеня, адже може призводити до підвищення опору СРФ.

Найбільш ймовірною причиною збільшення контактного куту змочування може бути граничний випадок адгезії (виникнення міжмолекулярної взаємодії між поверхневими шарами твердих й рідких тіл), так звана – хемосорбція, що протікає з утворенням на поверхні металу плівки хімічних з'єднань. Наявність саме таких плівок було виявлено при дефектації сіток СРФ (дивись розділ 2).

Таким чином, для визначення КУЗ сіток СРФ капілярних ЗЗС палива, що тривалий термін перебувають в рідкому ракетному КП (АТ та НДМГ) і під його парами формула (3.1) буде мати вигляд [195]:

$$\Delta H = \frac{Bo_{кр} \cdot \sigma}{\rho \cdot a \cdot (b_{чар} + 2 \cdot V_{кор} \cdot \tau)} \cdot \cos \theta . \quad (3.4)$$

Якщо виразити КУЗ у вигляді величини капілярного тиску, що буде утримувати сітка СРФ, то матимемо [195]:

$$\Delta P = \frac{Bo_{кр} \cdot \sigma}{(b_{чар} + 2 \cdot V_{кор} \cdot \tau)} \cdot \cos \theta = \frac{Bo_{кр} \cdot \sigma}{(b_{чар} \cdot k_{V_{кор. max}})} \cdot \cos \theta . \quad (3.5)$$

У (3.5) і (3.6) значення $Bo_{кр}$ буде відповідати (3.2).

Збільшення розміру чарунки сітки b за рахунок зменшення діаметру її дротів, внаслідок корозійних процесів для сіток СРФ, що тривалий термін перебуватимуть в рідкій фазі АТ та НДМГ і під парами, визначимо через коефіцієнт максимальної швидкості корозії (див. розділ 2): для сіток СРФ АТ – $k_{V_{кор. max}} = 1 + 0,0048 \cdot \tau$; для сіток СРФ НДМГ – $k_{V_{кор. max}} = 1 + 0,0053 \cdot \tau$ [205, 206].

Значення контактного кута змочування для сіток СРФ, що будуть тривалий термін перебувати в рідкій фазі АТ і під парами, буде дорівнювати 0° , тобто $\cos \theta = 1$ [195].

За результатами експерименту для сіток СРФ, що тривалий термін перебували під парами НДМГ на 31 рік середнє значення контактного куту змочування становить $\sim 25^\circ$. Отже, якщо припустити, що його зміна відбувалася за лінійною залежністю то для θ можемо записати [195]:

$$\theta = 0,8065 \cdot \tau. \quad (3.6)$$

Для використання при проектуванні капілярних ЗЗС палива, які будуть тривалий термін перебувати в рідкій фазі АТ або НДМГ і під їх парами формула (3.6) буде мати вигляд [195]:

- для КЛА, РУ яких використовують АТ у якості окислювача:

$$\Delta P_{AT} = \frac{(2,72 - 0,012 \cdot T) \cdot \sigma}{b_{чар} \cdot (1 + 0,0048 \cdot \tau)}. \quad (3.7)$$

- для КЛА, РУ яких використовують НДМГ у якості пального:

$$\Delta P_{НДМГ} = \frac{(2,72 - 0,012 \cdot T) \cdot \sigma}{b_{чар} \cdot (1 + 0,0053 \cdot \tau)} \cdot \cos(0,8065 \cdot \tau). \quad (3.8)$$

Межи використання отриманих залежностей: матеріал – нержавіюча сталь марки 12Х18Н10Т та близькі до неї за характеристиками; рідини – АТ, НДМГ; пари – АТ, НДМГ; температура – від мінус 5°C до плюс 35°C .

Використання підсумкових формул (3.8) та (3.9) дозволяє з більшою точністю, ніж це було раніше, розрахувати значення КУЗ, яка виражена через величину капілярного тиску, що буде утримувати сітка СРФ і тим самим оптимізувати кінцеву конструкцію капілярного ЗЗС палива, що проектується.

3.5 Висновки за розділом 3

З поданого в розділі 3 матеріалу, щодо експериментального визначення капілярної утримуючої здатності сітчастих розділювачів фаз капілярних ЗЗС палива можна зробити такі висновки:

1. Проведені експериментальні дослідження процесу зміни КУЗ сіток СРФ, які тривалий термін (від 14 до 31 року) знаходились під впливом хімічно агресивних КП (АТ та НДМГ) і їх парів.

2. За результатами експериментальних досліджень виявлено закономірності процесу втрати КУЗ внаслідок порушення рівноваги зовнішніх та внутрішніх сил на поверхні розподілу фаз «рідина-газ» капіляру в чарунці сітки, що залежать від терміну перебування конструкційного матеріалу сітки в компонентах палива, фази (рідка чи газова) і типу компоненту (АТ чи НДМГ). Отримано графіки лінійної регресії зміни значень КУЗ СРФ за часом. Максимальне зниження КУЗ отримано для сталевих сіток № 008, які впродовж 31 року перебували під впливом парів АТ та НДМГ, і складає: 11% (АТ) і 23% (НДМГ).

3. Вперше отримано, що у разі тривалого терміну перебування конструкційного матеріалу сітки № 008 в газовій фазі НДМГ (31 рік), внаслідок адгезійних процесів на поверхні металу з часом відбувається поступове збільшення контактного кута змочування θ з 0° до 25° .

4. Отримано нові (більш точні) коефіцієнти для напівемпіричної математичної моделі критичного числа Бонда, що суттєво підвищує точність визначення основних параметрів СРФ при проектуванні капілярних ЗЗС палива.

5. Подальшого вдосконалення отримали математичні моделі визначення проектних параметрів капілярних засобів забезпечення суцільності палива за рахунок вводу до них змінної складової – функції часу.

Основні наукові результати, що представлені у даному розділі, опубліковані у роботах [195, 205, 206, 208 – 213, 220 – 223].

РОЗДІЛ 4.

ІНЖЕНЕРНА МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ ОСНОВНИХ ПРОЕКТНИХ ПАРАМЕТРІВ КАПІЛЯРНИХ РОЗДІЛЮВАЧІВ ФАЗ З ТРИВАЛИМ ТЕРМІНОМ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

Основні технічні рішення щодо створення КЛА приймаються на етапі проектування, таким чином, розробнику необхідно мати адекватні методичні підходи, які дозволяють з прийнятним рівнем точності прогнозувати основні характеристики паливних систем і процесу їх функціонування протягом тривалого часу експлуатації (польоту). Це повинно зменшити загальні часові та матеріально-технічні витрати при виконанні проектних робіт.

Як було зазначено вище до основних проектних параметрів СРФ капілярних ЗЗС палива відносять: статичну та динамічну КУЗ, ЕКД пор, коефіцієнт гідравлічного опору СРФ, гідравлічний опір СРФ і мінімально потрібну площу змоченої поверхні СРФ. В розділі запропоновано методики розрахунку основних проектних параметрів СРФ, які тривалий термін знаходяться під впливом хімічно агресивних КП (АТ та НДМГ) і їх парів.

Вихідними даними для розрахунку основних проектних параметрів СРФ капілярних ЗЗС палива є фізичні характеристики КП, витрата КП, габарити бака, умови польоту КЛА, зокрема, напрям і величина несприятливих прискорень, а також циклограма роботи РУ КЛА.

4.1 Методика розрахунку статичної капілярної утримуючої здатності сітчастих розділювачів фаз з тривалим терміном експлуатації

У другому та третьому розділах були визначені: швидкість корозії основного конструкційного матеріалу СРФ та зміна КУЗ СРФ, які тривалий термін перебували під впливом хімічно агресивних КП (АТ та НДМГ) і їх парів. Отримані залежності та формули дозволяють визначити статичну КУЗ СРФ капілярних ЗЗС палива, враховуючи їх тривалий термін експлуатації в хімічно агресивних КП. Це дозволяє вдосконалити характеристики

капілярних ЗЗС палива, які проектуються, зробити їх більш надійними, а також забезпечити оптимальні коефіцієнти запасу працездатності.

Вихідними даними при проведенні інженерних розрахунків є:

- a) основні геометричні характеристики чарунки сітки СРФ – тип плетіння сітки (полотняний або саржевий); характерний розмір чарунки сітки у світлі $b_{\text{чар}}$;
- b) польотні параметри – прискорення масових сил a ;
- c) робоча температура компонента палива T ;
- d) характеристики рідини – густина ρ ; коефіцієнт поверхневого натягу σ ; максимальна висота стовпа рідини, що утримує СРФ, ΔH ;
- e) характеристика кривизни поверхні розподілу фаз – контактний кут змочування між ПРФ «рідина – газ» та твердим тілом θ ;
- f) характеристика швидкості корозійних процесів – максимальна швидкість корозії $V_{\tau \text{max}}^*$;
- g) характеристика часу – запланований термін експлуатації СРФ капілярних ЗЗС палива під впливом хімічно агресивних КП (АТ та НДМГ) і їх парів τ .

Загальний алгоритм розрахунку має вигляд:

- 1) Статичну КУЗ визначають виходячи з вимоги утримання рідини СРФ при пасивному польоті, згідно з формулою (1.17), що еквівалентно співвідношенню [1, 12]:

$$\Delta P_{\Gamma} \leq \Delta P_{\text{К}}, \quad (4.1)$$

де ΔP_{Γ} – перепад гідростатичного тиску на СРФ; $\Delta P_{\text{К}}$ – капілярний перепад тиску на ПРФ «рідина-газ» у чарунці сітки СРФ.

- 2) Перепад гідростатичного тиску ΔP_{Γ} на СРФ визначається виходячи з прийнятої розрахункової схеми капілярного ЗЗС палива, за допомогою рівняння Бернуллі:

$$P_1 + \rho \cdot a \cdot Z_1 + \frac{\rho \cdot W_1^2}{2} = P_2 + \rho \cdot a \cdot Z_2 + \frac{\rho \cdot W_2^2}{2} + \xi_{1-2} \cdot \frac{\rho \cdot W_2^2}{2}, \quad (4.2)$$

$$\Delta P_{\Gamma} = P_1 - P_2, \quad (4.3)$$

де P_1, P_2 – гідростатичний тиск у початковому та кінцевому перерізах потоку; Z_1, Z_2 – координати початкового та кінцевого перерізів щодо

довільної базової площини у напрямку, протилежному напрямку дії масових сил; a – прискорення масових сил; W_1, W_2 – швидкість течії в початковому та кінцевому перерізах потоку; ξ_{1-2} – сумарний коефіцієнт гідравлічного опору в потоці між початковим та кінцевим перерізами; ρ – густина рідини.

Сумарний коефіцієнт гідравлічного опору ξ_{1-2} визначаються як сума втрат тиску на тертя та втрат на місцевих гідравлічних опорах:

$$\xi_{1-2} = \xi_{\text{тер}} - \xi_{\text{м}}, \quad (4.4)$$

де $\xi_{\text{тер}}$ – коефіцієнт опору тертя; $\xi_{\text{м}}$ – коефіцієнт втрат тиску на місцевому опорі.

3) Для визначення статичної КУЗ СРФ рівняння (4.3) набуває вигляду:

$$\Delta P_{\text{к}} \geq \rho \cdot a \cdot \Delta H, \quad (4.5)$$

де ΔH – максимальна висота стовпа рідини, що утримує СРФ, або найбільший розмір КРФ вздовж лінії дії масових сил.

Оскільки капілярний перепад тиску для СРФ, виконаного із сітки з квадратними чарунками у світлі, визначається за формулою (1.15), співвідношення (4.1) (з урахуванням рівняння (4.5)) набуває вигляду формули (3.1), записаної у наступному вигляді:

$$\frac{Bo_{\text{кр}} \cdot \sigma}{b_{\text{чар}}} \cdot \cos \theta \geq \rho \cdot a \cdot \Delta H. \quad (4.6)$$

4) Підставляючи до лівої частини співвідношення (4.6) критичне значення числа Бонда за формулою (3.2), помножуючи $b_{\text{чар}}$ на відповідні коефіцієнти максимальної швидкості корозії, що були визначені у розділі 2 за формулою (2.9) та підставляючи значення θ для НДМГ згідно формули (3.6), отримаємо рівняння капілярного перепаду тиску для СРФ, що виконано із сітки з квадратними чарунками у світлі і має тривалий термін експлуатації в хімічно агресивних КП (АТ та НДМГ) і під їх парами:

- для КЛА, РУ яких використовують АТ у якості окислювача – (3.7):
- для КЛА, РУ яких використовують НДМГ у якості пального – (3.8):

5) Згідно з рівняннями (3.7), (3.8) і (4.6), визначаємо максимальне значення розміру чарунки сітки СРФ, за якого забезпечується працездатність капілярного ЗЗС палива:

- для КЛА, РУ яких використовують АТ у якості окислювача:

$$b_{\text{чар max AT}} = \frac{(2,72 - 0,012 \cdot T) \cdot \sigma}{\rho \cdot a \cdot \Delta H \cdot (1 + 0,0048 \cdot \tau)}, \quad (4.7)$$

- для КЛА, РУ яких використовують НДМГ у якості пального:

$$b_{\text{чар max НДМГ}} = \frac{(2,72 - 0,012 \cdot T) \cdot \sigma}{\rho \cdot a \cdot \Delta H \cdot (1 + 0,0053 \cdot \tau)} \cdot \cos(0,8065 \cdot \tau), \quad (4.8)$$

Прирівнюючи у залежностях (4.7) і (4.8) $b_{\text{чар max}}$ до діаметру порового капілярного каналу $d_{\text{п}}$ – отримаємо розрахункові формули для визначення ЕКД пор.

Відповідно до формул (4.7) і (4.8) при проектуванні капілярного ЗЗС палива обирається типорозмір сітки СРФ зі значенням розміру чарунки у світлі, який менше за розрахований, відповідно до найближчого типорозміру із наявного сортаменту сіток.

4.2 Методика розрахунку динамічної капілярної утримуючої здатності сігчастих розділювачів фаз з тривалим терміном експлуатації

Для випадку натікання рідини на СРФ при маневруванні КЛА в умовах невагомості (аналогічно програмному розвороту РРБ) аналіз динамічної КУЗ СРФ капілярного ЗЗС палива здійснюється за критерієм Вебера (We) та модифікованого числа Рейнольдса ($Re_{\text{м}}$) [20].

Вихідними даними при проведенні інженерних розрахунків є:

а) основні геометричні характеристики чарунки сітки СРФ – тип плетіння сітки (полотняний або саржевий); характерний розмір чарунки сітки у світлі $b_{\text{чар}}$;

б) основні геометричні характеристики баку – радіус бака R ;

с) польотні параметри – кутова швидкість ступеню ω ; відстань від СРФ до миттєвого центру обертання $L_{\text{МЦО}}$; момент інерції ступеню, щодо осі розвороту I_Z ; лінійне прискорення масових сил a ; кут між поздовжньою

вісню ступеня та напрямом тяги φ ; маса ступеню m ; відстань від центру мас ступеню до лінії дії тяги L_{yT} ; відстань від центру мас ступеню до площини СРФ, вздовж поздовжньої осі ступеню $X_{ЦМ}$; відстань від найбільш віддаленої чарунки СРФ до поздовжньої осі ступеня $Y_{ЦМ}$;

d) робоча температура компонента палива T ;

e) характеристики рідини – густина ρ ; коефіцієнт поверхневого натягу σ ; кінематична в'язкість ν ; висота стовпа рідини над СРФ h ;

f) характеристика часу – запланований термін експлуатації СРФ капілярних ЗЗС палива під впливом хімічно агресивних КП (АТ та НДМГ) і їх парів τ .

Загальний алгоритм розрахунку має вигляд:

1) Умова відсутності проникнення газу крізь сітку СРФ при обертальному русі КЛА навколо поперечної осі:

$$We \geq We_{кр}, \quad (4.9)$$

де We – число Вебера, що визначається експериментально за максимальною величиною швидкості натікання рідини на сітку СРФ; $We_{кр}$ – критичне число Вебера, яке визначається властивостями матеріалу СРФ.

Критичне число Вебера підтверджується, зазвичай експериментально.

2) Визначаємо максимальне значення розміру чарунки сітки СРФ, при якому забезпечується працездатність капілярного ЗЗС палива за умов дії лінійного прискорення масових сил і наявності кутової швидкості ступеню [224]:

- для КЛА РУ яких використовують АТ у якості окислювача:

$$b_{\text{чар max AT}}^{\text{дин}} = \frac{(2,72 - 0,012 \cdot T) \cdot \sigma}{k_{\text{дин}} \cdot [\rho \cdot \Delta H \cdot (a + \omega^2 \cdot \Delta H)] \cdot (1 + 0,0048 \cdot \tau)}, \quad (4.10)$$

- для КЛА РУ яких використовують НДМГ у якості пального:

$$b_{\text{чар max НДМГ}}^{\text{дин}} = \frac{(2,72 - 0,012 \cdot T) \cdot \sigma}{k_{\text{дин}} \cdot [\rho \cdot \Delta H \cdot (a + \omega^2 \cdot \Delta H)] \cdot (1 + 0,0053 \cdot \tau)} \cdot \cos(0,8065 \cdot \tau), \quad (4.11)$$

де $k_{\text{дин}}$ – коефіцієнт запасу по динамічній КУЗ СРФ (див. розділ 4.2.1).

Відповідно до формул (4.10) і (4.11) при проектуванні капілярного ЗЗС палива обирається типорозмір сітки СРФ зі значенням розміру чарунки у

світлі, який менше за розрахований, відповідно до найближчого типорозміру із наявного сортаменту сіток.

3) Розрахункова залежність визначення числа Вебера (We) має вид:

$$We = \frac{\omega^2 \cdot L_{\text{МЦО}}^2 \cdot \rho \cdot b_{\text{чар max}}^{\text{дин}}}{\sigma}, \quad (4.12)$$

де ω – кутова швидкість ступеня; $b_{\text{чар max}}$ – характерний розмір чарунки сітки, що визначається за формулами (4.7), (4.8); $L_{\text{МЦО}}$ – відстань від СРФ до миттєвого центру обертання, що визначається за формулою:

$$L_{\text{МЦО}} = \sqrt{\left(\frac{I_Z \cdot a \cdot \cos\varphi}{m \cdot L_{yT}} - X_{\text{ЦМ}}\right)^2 + \left(Y_{\text{ЦМ}} - \frac{I_Z \cdot a \cdot \sin\varphi}{m \cdot L_{yT}}\right)^2}, \quad (4.13)$$

де I_Z – момент інерції ступеню, щодо осі розвороту; a – лінійне прискорення масових сил; φ – кут між поздовжньою віссю ступеня та напрямом тяги; m – маса ступеню; L_{yT} – відстань від центру мас ступеню до лінії дії тяги; $X_{\text{ЦМ}}$ – відстань від центру мас ступеню до площини СРФ, вздовж поздовжньої осі ступеню; $Y_{\text{ЦМ}}$ – відстань від найбільш віддаленої чарунки СРФ до поздовжньої осі ступеня.

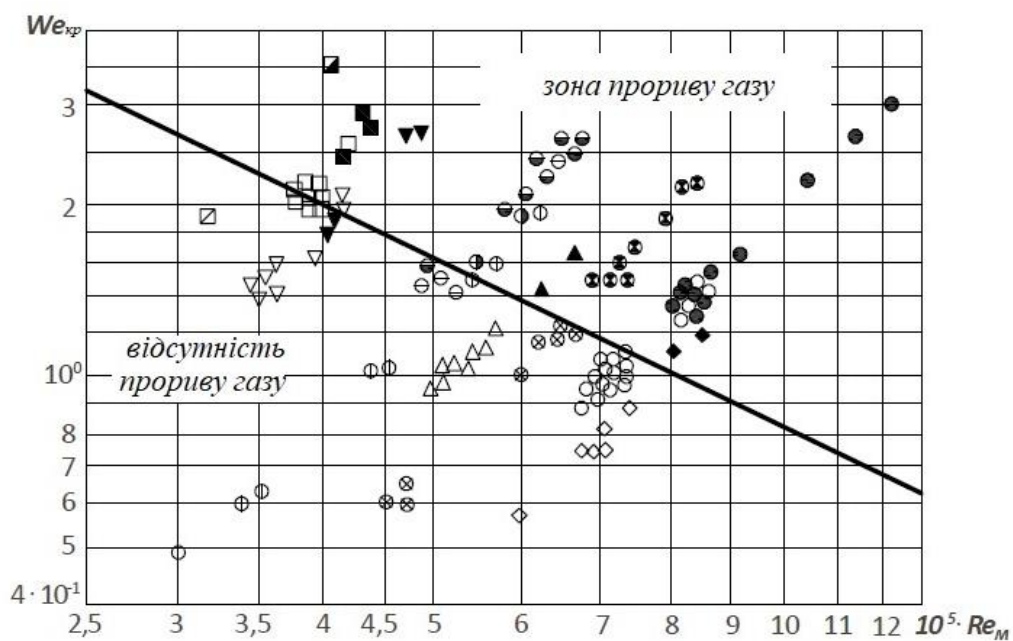
4) Модифіковане число Рейнольдса (Re_M) вираховується за формулою:

$$Re_M = \frac{\omega \cdot L_{\text{МЦО}} \cdot R^2}{\nu \cdot h}, \quad (4.14)$$

де R – радіус бака; ν – кінематична в'язкість КП; h – висота рівня КП над СРФ перед початком програмного розвороту.

5) Емпірична залежність критичного числа Вебера ($We_{\text{кр}}$) від модифікованого числа Рейнольдса (Re_M) для СРФ наведено на Рис. 4.1 [11].

6) Після визначення числа Вебера (We) та критичного числа Вебера ($We_{\text{кр}}$) їх значення повинні відповідати умовам залежності (4.8). Наразі невиконання цих умов проводиться перерахунок визначення максимального значення розміру чарунки сітки СРФ за формулами (4.10) і (4.11) з більшим значенням $k_{\text{дин}}$.



Символ	$R, \text{ мм}$	$x_{\text{ЦМ}}, \text{ мм}$	h / R	$b_{\text{чар}}, \text{ мм}$	Рідина
○, ●	54	372	0,27	0,04	Б-70
△, ▲	54	372	0,305	0,04	Б-70
□, ■	54	372	0,27	0,04	ТС-1
◇, ◆	54	492	0,26	0,04	Б-70
▽, ▼	54	492	0,26	0,04	ТС-1
⊕, ⊙	38,6	360	0,276	0,04	Б-70
⊠, ⊡	38,6	360	0,234	0,04	Т-1
⊗, ⊛	38,6	275	0,234	0,04	Б-70
⊖, ⊚	38,6	275	0,234	0,08	Б-70

Рис. 4.1. Залежність критичного числа Вебера від модифікованого числа Рейнольдса

4.2.1 Визначення коефіцієнта запасу по динамічній капілярній утримуючій здатності сітчастих розділювачів фаз з тривалим терміном експлуатації

Оскільки умовою відсутності проникнення газу крізь сітку СРФ при оголенні його внаслідок інерційного руху рідини при обертальному русі ступеня навколо поперечної осі визначається за виконанням умов рівняння

(4.9), розрахуємо число Вебера (We) і порівняємо з його критичним значенням ($We_{кр}$) для РББ РН «Дніпро».

Критичне значення числа Вебера ($We_{кр}$) визначене за результатами експериментального відпрацювання дорівнює – $We_{кр} = 1$ [86].

Максимальне значення розміру чарунки сітки СРФ, при якому забезпечується працездатність капілярного ЗЗС палива, з урахування тривалого терміну експлуатації СРФ в хімічно агресивних КП (АТ та НДМГ) і під їх парами (визначено на 31 рік експлуатації за матеріалами, що наведено у розділі 2.6) дорівнює:

- для сіток СРФ АТ – $b_{чар\ max\ АТ} = 91,8$ мкм;
- для сіток СРФ НДМГ – $b_{чар\ max\ НДМГ} = 93,2$ мкм.

Значення кутових швидкостей та координати центру мас для РББ РН «Дніпро» з декількома комерційними космічними апаратами наведено у Таблиці 4.1 [86].

Таблиця 4.1

Значення кутових швидкостей та координати центру мас для РББ РН «Дніпро» з декількома комерційними космічними апаратами

№	Космічний апарат	$L_{МЦО}$, м	ω_y , град/с	ω_z , град/с
1	Демонстраційний пуск з макетом корисного навантаження	2,036	1,1±1,5	0,3±1,5
2	«Дніпро – IRIDIUM»	1,950	0,8±1,2	0,8±1,3
3	«Дніпро – RAZ»	1,739	0,8±1,2	0,8±1,3
4	«Дніпро – 2013 №1»	1,568	0,8±1,2	0,8±1,3
5	«Дніпро – GRACE-FO»	1,628	0,8±1,2	0,8±1,3
6	«Дніпро – PL»	1,595	0,8±1,2	0,8±1,3
7	«Дніпро – 2016 №1»	1,648	0,8±1,2	0,8±1,3

На підставі наведених вище початкових даних розрахуємо максимальне значення кутових швидкостей за формулою:

$$\omega = \sqrt{\omega_{max\ y}^2 + \omega_{max\ z}^2} , \quad (4.15)$$

Отримані значення ω , разом іншими початковими даними наведеними вище, підставимо у формулу (4.13), розрахуємо значення чисел Вебера (We), порівняємо їх з його критичним значенням ($We_{кр}$) і розрахуємо коефіцієнт запасу, що мається, за формулою:

$$k_{We} = \frac{We_{кр}}{We}, \quad (4.16)$$

Отримані результати розрахунків коефіцієнту запасу працездатності по числу Вебера (We) для СРФ капілярних ЗЗС палива РРБ РН «Дніпро» наведено у Таблиці 4.2.

Таблиця 4.2

Коефіцієнту запасу працездатності по числу Вебера (We) для СРФ капілярних ЗЗС палива РРБ РН «Дніпро» за декількома комерційними писками

№	Космічний апарат	ω , град/с	We_{AT}	$We_{НДМГ}$	$We_{кр}$	k_{We}^{AT}	$k_{We}^{НДМГ}$
1	Демонстраційний пуск з макетом корисного навантаження	3,16	0,061	0,037	1	16	27
2	«Дніпро – IRIDIUM»	2,90	0,047	0,029	1	21	35
3	«Дніпро – PAZ»	2,90	0,038	0,023	1	27	44
4	«Дніпро – 2013 №1»	2,90	0,031	0,019	1	33	54
5	«Дніпро – GRACE-FO»	2,90	0,033	0,020	1	30	50
6	«Дніпро – PL»	2,90	0,032	0,019	1	32	52
7	«Дніпро –2016 №1»	2,90	0,034	0,021	1	30	49

Як видно з Таблиці 4.2 мінімальні коефіцієнти запасу працездатності СРФ капілярних ЗЗС палива по числу Вебера (We) склали: для СРФ АТ $k_{We}^{AT} = 16$, для СРФ НДМГ $k_{We}^{НДМГ} = 27$. Середні значення коефіцієнта запасу складають: для СРФ АТ $k_{We_{сер}}^{AT} = 27$, для СРФ НДМГ $k_{We_{сер}}^{НДМГ} = 44$.

Проведемо аналогічні розрахунки для СРФ капілярних ЗЗС палива РРБ РН «Циклон-4».

Із аналізу початкових даних визначимо, що найбільш навантаженим є випадок програмного розвертання з параметрами, які наведено у Таблиці 4.3 [225].

Таблиця 4.3

Початкові дані для розрахунків чисел Вебера (We) по системам окислювача і пального для РРБ РН «Циклон-4»

Система окислювача (АТ)	Система пального (НДМГ)
$\omega = 2$ град/с	$\omega = 2$ град/с
$I_Z = 340$ кгс·м·с ²	$I_Z = 1659$ кгс·м·с ²
$h = 0,02$ м	$h = 0,096$ м
$X_{ЦМ} = 0,679$ м	$X_{ЦМ} = 3,466$ м
$m = 2000$ кг	$m = 2000$ кг
$L_{yT} = 1,740$ м	$L_{yT} = 1,740$ м
$\varphi = 0$	$\varphi = 0$
$Y_{ЦМ} = 0,400$ м	$Y_{ЦМ} = 0,430$ м
$R = 1,037$ м	$R = 0,420$ м

Підставляючи початкові дані наведені у Таблиці 4.3 у формулі (4.12), (4.13), (4.14), (4.16) і користуючись графіком Рис. 4.1 розрахуємо значення чисел Вебера (We), порівняємо їх з його критичним значенням ($We_{кр}$) і визначимо коефіцієнт запасу для різних типорозмірів сіток СРФ капілярних ЗЗС палива.

Отримані результати розрахунків коефіцієнту запасу працездатності по числу Вебера (We) для СРФ капілярних ЗЗС палива РРБ РН «Циклон-4» наведено у Таблиці 4.4 [225].

Таблиця 4.4

Коефіцієнту запасу працездатності по числу Вебера (We) для СРФ капілярних ЗЗС палива РРБ РН «Циклон-4» з різними типорозмірами сіток СРФ

№	№ сітки СРФ	Re_M	$We_{кр}$	We	k_{We}
Система окислювача (АТ)					
1	0040	$4,66 \cdot 10^6$	0,2	$1,64 \cdot 10^{-3}$	122
2	008	$4,66 \cdot 10^6$	0,2	$3,27 \cdot 10^{-3}$	61
3	014	$4,66 \cdot 10^6$	0,2	$5,72 \cdot 10^{-3}$	35
4	016	$4,66 \cdot 10^6$	0,2	$6,54 \cdot 10^{-3}$	31
5	020	$4,66 \cdot 10^6$	0,2	$8,18 \cdot 10^{-3}$	24

Система пального (НДМГ)					
1	0040	$1,47 \cdot 10^6$	0,46	$1,90 \cdot 10^{-2}$	24
2	008	$1,47 \cdot 10^6$	0,46	$3,80 \cdot 10^{-2}$	12
3	014	$1,47 \cdot 10^6$	0,46	$6,65 \cdot 10^{-2}$	7
4	016	$1,47 \cdot 10^6$	0,46	$7,60 \cdot 10^{-2}$	6
5	020	$1,47 \cdot 10^6$	0,46	$9,50 \cdot 10^{-2}$	5

Як видно з Таблиці 4.4 коефіцієнти запасу працездатності СРФ по числу Вебера (We) для використаних у існуючій конструкції капілярних ЗЗС палива сіток саржевого типу плетіння №0040 дорівнює: для СРФ АТ $k_{We}^{AT} = 122$, для СРФ НДМГ $k_{We}^{НДМГ} = 24$. Хоча, навіть використання сіток №020 дозволяло мати все ще надмірний коефіцієнт запасу: для СРФ АТ $k_{We}^{AT} = 24$, для СРФ НДМГ $k_{We}^{НДМГ} = 5$.

Наведені вище результати розрахунків відносно коефіцієнта запасу працездатності по числу Вебера (We) для існуючих конструкцій СРФ капілярних ЗЗС палива РРБ РН «Дніпро» і «Циклон-4» свідчать о використанні розробниками надмірних коефіцієнтів запасу, що веде до використання перерозмірених типорозмірів сіток у якості КРФ і, як наслідок цього, можливого ускладненню конструкції капілярних ЗЗС палива, збільшенню її ваги та гідравлічного опору на СРФ.

Більшість відомих джерел, які ґрунтуються на експериментальних дослідженнях наполягають на використанні якнайменш можливого значення коефіцієнта запасу по динамічній КУЗ, що значно покращує параметри СРФ капілярних ЗЗС палива і робить їх більш оптимальними [1, 12, 86, 88]. Тому при розрахунках динамічної капілярної утримуючої здатності СРФ з тривалим терміном експлуатації доцільно використовувати коефіцієнт запасу по динамічній КУЗ, що знаходиться у межах $1,3 \leq k_{дин} \leq 1,5$ від значення статичної КУЗ.

4.3 Методика розрахунку гідравлічного опору сітчастого розділювача фаз з тривалим терміном експлуатації

Після тривалого терміну експлуатації СРФ капілярних ЗЗС палива в хімічно агресивних КП (АТ та НДМГ) і під їх парами, внаслідок корозійних вражень дротів сітки відбувається збільшення розмірів чарунок, що в свою чергу зменшує гідравлічний опору СРФ.

Використовуючи результати досліджень швидкості корозії основного конструкційного матеріалу СРФ в рідкій фазі АТ та НДМГ і під їх парами, які наведені у другому розділі даної роботи, а також залежності наведені у розділі 1.2, були визначені формули, що дозволяють розрахувати гідравлічний опір при протіканні рідини скрізь сітку.

Вихідними даними при проведенні інженерних розрахунків є:

а) основні геометричні характеристики чарунки сітки СРФ – тип плетіння сітки (полотняний або саржевий); характерний розмір чарунки сітки у світлі $b_{\text{чар}}$; діаметр дротів сітки δ^* ;

б) гідродинамічні параметри – середня швидкість потоку рідини перед сіткою u_1 ; середня швидкість потоку рідини у живому перетині сітки u_0 ; витрати КП крізь сітку СРФ Q_0 ;

с) робоча температура компонента палива T ;

д) характеристики рідини – густина ρ ; коефіцієнт поверхневого натягу σ ; динамічна в'язкість рідини при відповідній температурі μ ;

е) характеристика кривизни поверхні розподілу фаз – контактний кут змочування між ПРФ «рідина – газ» та твердим тілом θ ;

ф) характеристика часу – запланований термін експлуатації СРФ капілярних ЗЗС палива під впливом хімічно агресивних КП (АТ та НДМГ) і їх парів τ .

Загальний алгоритм розрахунку має вигляд:

1) За допомогою модифікації формули (1.23) визначається число Рейнольдса з урахуванням зміни товщини дроту сітки СРФ в процесі тривалої експлуатації:

$$Re = \frac{u_0 \cdot \delta^* \cdot K_{V\tau \max}^{\delta^*}}{\mu}, \quad (4.17)$$

де u_0 – середня швидкість потоку рідини у живому перетині сітки; δ^* – товщина дроту сітки; μ – в'язкість рідини при відповідній температурі; $K_{V_{\tau}^{\max}}^{\delta^*}$ – коефіцієнту максимальної швидкості корозії, який визначатися відносно зменшення діаметра дротів сітки (дані наведені у розділі 2.6).

- для КЛІА РУ яких використовують АТ у якості окислювача:

$$Re_{AT} = \frac{u_0 \cdot \delta^* \cdot (1 - 0,0035 \cdot \tau)}{\mu}, \quad (4.18)$$

- для КЛІА РУ яких використовують НДМГ у якості пального:

$$Re_{НДМГ} = \frac{u_0 \cdot \delta^* \cdot (1 - 0,0039 \cdot \tau)}{\mu}. \quad (4.19)$$

2) Коефіцієнт гідравлічного опору сітки визначається відповідно до формул (1.22), (1.24) та (1.25).

У формулі (1.25) характерний розмір чарунок сітки визначаються за формулами (4.7), (4.8) або (4.10), (4.11), в залежності від умов функціонування капілярних ЗЗС палива (статичних, чи динамічних).

3) Гідравлічний опір при протіканні рідини скрізь сітку ($\Delta P_{г.е.}^c$) для СРФ капілярних ЗЗС палива, що тривалого терміну перебували під впливом хімічно агресивних КП (АТ та НДМГ) і їх парів буде розраховуватися за модифікованою формулою (1.21) [84]:

$$\Delta P_{г.е.}^c = \xi \cdot \frac{\rho \cdot u_1^2}{2} \cdot k_{гидр}, \quad (4.20)$$

де, ξ – коефіцієнт гідравлічного опору сітки; u_1 – середня швидкість потоку рідни перед сіткою; $k_{гидр}$ – коефіцієнт запасу ($k_{гидр} = 1,25$) [85].

4) При цьому мінімально потрібна площа змоченої сітки, що забезпечує постачання КП без газових включень буде визначається за формулою:

$$S_{min} = \sqrt{\frac{\xi \cdot Q_0^2 \cdot \rho \cdot b_{чар}}{Bo_{кр} \cdot 2 \cdot \sigma \cdot \cos \theta}} \cdot k_3, \quad (4.21)$$

де $b_{\text{чар}}$ – характерний розмір чарунок сітки, яких визначаються за формулами (4.7), (4.8), або (4.10), (4.11), в залежності від умов функціонування капілярних ЗЗС палива; k_3 – коефіцієнт запасу ($k_3 = 3$) [225].

- S_{min} для СРФ капілярних ЗЗС палива, що тривалий термін перебували під впливом хімічно агресивного КП АТ і його парів буде розраховуватися за формулою:

$$S_{\text{min}}^{\text{АТ}} = \sqrt{\frac{\xi \cdot Q_0^2 \cdot \rho \cdot b_{\text{чар}}}{(2,72 - 0,012 \cdot T) \cdot 2 \cdot \sigma}} \cdot k_3, \quad (4.22)$$

- S_{min} для СРФ капілярних ЗЗС палива, що тривалий термін перебували під впливом хімічно агресивного КП НДМГ і його парів буде розраховуватися за формулою:

$$S_{\text{min}}^{\text{НДМГ}} = \sqrt{\frac{\xi \cdot Q_0^2 \cdot \rho \cdot b_{\text{чар}}}{(2,72 - 0,012 \cdot T) \cdot 2 \cdot \sigma \cdot \cos(0,8065 \cdot \tau)}} \cdot k_3, \quad (4.23)$$

4.4 Висновки за розділом 4

З поданого в розділі матеріалу, щодо дослідження впливу тривалого терміну експлуатації СРФ капілярних ЗЗС палива в хімічно агресивних КП (АТ та НДМГ) і під парами на їх КУЗ можна зробити такі висновки:

1. На основі визначених при науково-експериментальних дослідженнях закономірностей розроблені інженерні методики розрахунку основних проектних параметрів сітчастих розділювачів фаз капілярних засобів забезпечення суцільності палива з тривалим терміном експлуатації, а саме:

- статичної капілярної утримуючої здатності;
- динамічної капілярної утримуючої здатності;
- гідравлічного опору.

2. Межи використання залежностей (3.2, 3.7, 3.8, 4.6, 4.7, 4.10, 4.11, 4.17, 4.18, 4.21 та 4.22), що наведено в розроблених методиках: матеріал – нержавіюча сталь марки 12Х18Н10Т та близькі до неї за характеристиками;

рідини – АТ, НДМГ; пари – АТ, НДМГ; температура – від мінус 5⁰С до плюс 35⁰С.

3. Проведення інженерних розрахунків за даними методиками дозволяє:

- визначити статичну і динамічну КУЗ капілярних ЗЗС палива, СРФ яких виконано із сіток з квадратними чарунками у світлі (будь яких типорозмірів) і має тривалий термін експлуатації в хімічно агресивних КП (АТ та НДМГ) і під їх парами;

- підібрати оптимальне значення коефіцієнта запасу по динамічній КУЗ СРФ капілярних ЗЗС палива з тривалим терміном експлуатації;

- підібрати оптимальний типорозмір сітки, при якому забезпечується надійна працездатність СРФ капілярного ЗЗС палива;

- визначити гідравлічний опір СРФ капілярних ЗЗС палива і мінімально потрібну площу змоченої сітки СРФ, що забезпечує постачання КП без газових включень для СРФ які виконані з сітки з квадратними чарунками у світлі (будь яких типорозмірів) і мають тривалий термін експлуатації в хімічно агресивних КП (АТ та НДМГ) і під їх парами;

- вдосконалити характеристики капілярних ЗЗС палива, які проектуються, зробити їх більш надійними, а також забезпечити оптимальні коефіцієнти запасу працездатності.

Основні наукові результати, що представлені у даному розділі, опубліковані у роботах [86, 195, 205, 206, 224].

ВИСНОВКИ

Дисертація є завершеною науково-дослідною роботою, в якій вирішено актуальне наукове завдання з удосконалення вибору проектних параметрів капілярних засобів забезпечення суцільності палива систем запуску двигуна космічних літальних апаратів у невагомості в залежності від терміну їх експлуатації в хімічно агресивних компонентах палива (азотному тетроксиді та несиметричному диметилгідрозині) і під їх парами.

Найбільш важливі наукові і прикладні результати дисертаційного дослідження полягають у наступному:

1. Уточнено залежність швидкості корозії основного конструкційного матеріалу сітчастого розділювача фаз (на прикладі сітки зі сталі марки 12X18H10T саржевого типу плетіння № 008 з квадратною чарункою у світлі) від терміну їх перебування в хімічно агресивних компонентах палива (азотному тетроксиді та несиметричному диметилгідрозині) і під їх парами.

2. Вперше виявлено, що корозія сталі 12X18H10T у газовій фазі азотного тетроксиду та несиметричного диметилгідрозину протікає ~ 1,5 рази швидше, ніж у рідкій. У середньому вона, майже у 2 рази перевищує відоме теоретичне значення, яке дорівнює $1 \cdot 10^{-4}$ мм на рік. Складає $1,91 \cdot 10^{-4}$ для азотного тетроксиду та $2,13 \cdot 10^{-4}$ для несиметричного диметилгідрозину, що еквівалентно збільшенню розміру чарунок (на 31 рік експлуатації) з номінального значення у 80 мкм до 91,8 мкм (для азотного тетроксиду) та 93,2 мкм (для несиметричного диметилгідрозину).

3. Виявлено закономірності процесу втрати капілярної утримуючої здатності внаслідок порушення рівноваги зовнішніх та внутрішніх сил на поверхні розподілу фаз «рідина-газ» капіляру в чарунці сітки, що залежать від терміну перебування конструкційного матеріалу сітки в агресивних компонентах палива, фази (рідка чи газова) і типу компоненту (азотний тетроксид чи несиметричний диметилгідрозин). Отримано графіки лінійної регресії зміни значень капілярної утримуючої здатності сітчастих

розділювачів фаз за часом. Максимальне зниження капілярної утримуючої здатності, що отримано для сталевих сіток № 008, які впродовж 31 року перебували під впливом парів азотного тетроксиду та несиметричного диметилгідразину складає: 11% (для азотного тетроксиду) і 23% (для несиметричного диметилгідразину).

4. Вперше отримано, що у разі тривалого терміну перебування конструкційного матеріалу сітки № 008 в газовій фазі несиметричного диметилгідразина (31 рік), внаслідок адгезійних процесів на поверхні металу з часом відбувається поступове збільшення контактного кута змочування θ з 0° до 25° .

5. Отримано нові (більш точні) коефіцієнти для напівемпіричної математичної моделі критичного числа Бонда, що суттєво підвищує точність визначення основних параметрів СРФ при проектуванні капілярних ЗЗС палива.

6. Подальшого вдосконалення отримали математичні моделі визначення проектних параметрів капілярних засобів забезпечення суцільності палива за рахунок введення до них змінної складової – функції часу.

7. Розраховано коефіцієнти максимальної швидкості корозії, застосування яких вдосконалює інженерні методики розрахунків основних параметрів сітчастих розділювачів фаз капілярних засобів забезпечення суцільності палива під час їх проектування.

8. На основі визначених при науково-експериментальних дослідженнях закономірностей розроблені інженерні методики розрахунку основних проектних параметрів сітчастих розділювачів фаз капілярних засобів забезпечення суцільності палива з тривалим терміном експлуатації, а саме:

- статичної капілярної утримуючої здатності;
- динамічної капілярної утримуючої здатності;
- гідравлічного опору.

9. Використовуючи удосконалений підхід до визначення основних проектних параметрів сітчастих розподілювачів фаз капілярних засобів забезпечення суцільності палива з тривалим терміном експлуатації у хімічно

агресивних компонентах палива (азотному тетроксиді та несиметричному диметилгідразині) і під їх парами, можливо оперативно та з більшою точністю, ніж це було раніше, визначити: статичну і динамічну капілярну утримуючу здатність, еквівалентний капілярний діаметр пор, коефіцієнт гідравлічного опору і мінімально потрібну площу змоченої поверхні сітчастого розділювача фаз, застосовувати оптимальні значення коефіцієнтів запасу і підібрати оптимальний типорозмір сітки ще на етапі ескізного проектування, що дозволить оптимізувати обрану конструкцію і зробити її більш надійною.

10. Використання удосконалених методик вибору основних проектних параметрів сітчастих розподілювачів фаз капілярних засобів забезпечення суцільності палива з тривалим терміном експлуатації у хімічно агресивних компонентах палива (азотному тетроксиді та несиметричному диметилгідразині) і під їх парами, дозволяє зменшити кількість експериментальних випробувань (або відмовитись від них взагалі) і, тим самим, зменшити загальні часові та матеріально технічні витрати при виконанні проектних робіт.

Результати теоретичних та експериментальних досліджень, розрахункові моделі, а також розроблені методики визначення основних проектних параметрів сітчастих розподілювачів фаз капілярних засобів забезпечення суцільності палива з тривалим терміном експлуатації у хімічно агресивних компонентах палива (азотному тетроксиді та несиметричному диметилгідразині) і під їх парами знайшли практичне використання (підтверджено актами впровадження та апробування) у виробничому процесі ДП «КБ «Південне» ім. М.К. Янгеля під час виконання робіт з розробки перспективних космічних літальних апаратів та їх окремих систем. Результати дисертаційних досліджень використовуються у процесі проведення лекційних, практичних і лабораторних занять відповідно до навчальних планів на кафедрі ракетно-космічних та інноваційних технологій Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара, що підтверджено відповідними актами впровадження (наведено у додатку А).

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Багров В. В., Курпатенков А. В., Поляев В. М. и др. *Капиллярные системы отбора жидкости из баков космических летательных аппаратов*. Под. ред. В. М. Поляева. М.: УНПЦ «Энергомаш», 1997. 328 с.
2. Платов И. В., Симонов А. В. Разработка конструкции двигательных установок и траекторий космических аппаратов проекта «Лаплас-II» для исследований планетарной системы Юпитера. *Вестн. СибГАУ. Сер. Авиационная и ракетно-космическая техника*. 2016. 17, № 3. С. 710-721.
3. Платов И. В., Симонов А. В. Разработка двигательной установки на базе двигателей малой тяги и схемы полёта космических аппаратов к центру Солнечной системы. *Сиб. журн. науки и технологий. Сер. Авиационная и ракетно-космическая техника*. 2018. **19**, № 3. С. 517-525. <https://doi.org/10.31772/2587-6066-2018-19-3-517-525>.
4. Snead J. M., Hellman B. H. Near-future reusable space logistics vehicles. *43rd Propulsion Conf. & Exhibit*. AIAA/ASME/SAE/ASEE. 2007. P. 1-20. <https://doi.org/10.2514/6.2007-5847>.
5. Bienhoff D. *The future of commercial space transportation*. URL: <https://www.thespacereview.com/article/3776/1> (Last accessed: 06.06.2023).
6. *Lunar market assessment: market trends and challenges in the development of a lunar economy*. 2021. URL: <https://www.pwc.com.au/industry/space-industry/lunar-market-assessment-2021.pdf> (Last accessed: 06.06.2023).
7. *Zombie Satellites Return From the Graveyard. Mission Extension Vehicles give dead spacecraft a new lease on life*. 2022. URL: <https://spectrum.ieee.org/zombie-satellites-return-from-the-graveyard> (Last accessed: 06.06.2023).
8. Kornuta D., Abbud-Madrid A., Atkinson J., et al. *Commercial lunar propellant architectechnical specificationre. A collaborative stechnical*

specificationdy of lunar propellant production. 2019. 77 p.
<https://doi.org/10.1016/j.reach.2019.100026>.

9. Abrego A., Bair C., Hink A., et al. *Project Hyreus: Mars sample retechnical specification mission utilizing in sitechnical specification propellant production.* Washington: Univ.; Dept. of Aeronautics and Astronautics. NASA-CR-197189. 1993. 383 p.

10. Мінай О. М. Класифікація, основні типи конструкцій та призначення капілярних засобів забезпечення суцільності палива. *Космічна наука і технологія.* 2024. **30**, № 1 (146). С. 14-30.
<https://doi.org/10.15407/knit2024.01.014>.

11. Валов А. А., Савушкин Н. Ф. Системы питания, использующие силы поверхностного натяжения: обзор по материалам иностранной научно-технической и патентной информации. *Головной отдел научно-технической информации – 4, Сер. III.* 1987. № 20. 73 с.

12. Шевченко Б. А. *Расчетный и экспериментальный метод разработки средств забора компонентов из баков летательных аппаратов с жидкостным ракетным двигателем:* дис. канд. техн. наук. Днепропетровск, 1990. 209 с.

13. Ринг Э. *Двигательные установки ракет на жидком топливе.* М.: Мир, 1968. 404 с.

14. Козлов А. А., Новиков В. Н., Соловьёв Е. В. *Системы питания и управления жидкостных ракетных двигательных установок.* М.: Машиностроение, 1988. 352 с.

15. Полухин Д. А., Орешенко В. М., Морозов В. А. *Отработка пневмогидравлических систем двигательных установок ракет-носителей и космических аппаратов с ЖРД.* М.: Машиностроение, 1987. 248 с.

16. Биркгоф Г., Сарантанелло Э. *Струи, следы и каверны.* М.: Мир, 1964. 466 с.

17. Челомей В. Н., Полухин Д. А., Миркин Н. Н. и др. *Пневмогидравлические системы двигательных установок с жидкостными ракетными двигателями*. М. : Машиностроение, 1978. 240 с.

18. Ковалевский М. М. Проблемы термостатирования баков в условиях малых перегрузок путем дренирования части компонента в окружающее пространство: обзор по материалам иностранной печати. *Головной отдел научно-технической информации*. 1970. № 4. 48 с.

19. *Научно-технический отчет О НИИР, Книга 2, Х/Т №2046*. «ФУРИЛ-МВО», 1989. 208 с.

20. Беляев Н. М. *Расчет пневмогидравлических систем ракет*. М.: Машиностроение, 1983. 219 с.

21. Беляев Н. М., Уваров Е. И. *Расчет и проектирование реактивных систем управления космических летательных аппаратов*. М.: Машиностроение, 1974. 200 с.

22. Blackmon J. B. Collection of liquid propellant in zero gravity with electric forces. *AIAA Paper*. 1984. № 265. P. 391-398. <https://doi.org/10.2514/3.28190> .

23. Melcher J. R. Dielectroforetic liquid expulsion. *J. Spacecraft and Rockets*. 1969. 6, № 9. P. 961-967.

24. *Patent Bundesrepublik Deutschland № 2506489*. Laaber D. G., Hivert A. P. Selbstentleerender Behälter für Raumfahrzeuge. Declared 15.02.75; publ. 17.08.78.

25. Rollins J., Grove R., Jaekle D. Twenty-three years of surface tension propellant management system design, development, manufacture, test, and operation. *21st Joint Propulsion Conf*. 1985. 9 p. <https://doi.org/10.2514/6.1985-1199>.

26. Tegart J. R., Wright N. T. Double perforated plate as a capillary barrier. *19th Joint Propulsion Conf*. 1983. № 1379. 7 p. <https://doi.org/10.2514/6.1983-1379>.

27. Краев М. В., Кишкин А. А., Мелкозеров М. Г. Гидродинамика двухфазного потока в камере пассивного фазоразделителя. *Изв. вузов. Авиационная техника*. 2002. № 3. С. 22-26.

28. Dowdy M. W., De-Brock S. C. Selection of a surface tension propellant management system for the Viking-75 Orbiter. *J. Spacecraft and Rockets*. 1973. **10**, № 9. P. 549-558.

29. McCraney J. et al. The draining of capillary liquids from containers with interior corners aboard the ISS. *Published in cooperation with the Biodesign Institute at Arizona State University, with the support of NASA. npj Microgravity*. 2021. **45**. 11 p. <https://doi.org/10.1038/s41526-021-00173-5> .

30. Давыдов С. А., Горелова К. В. История совершенствования конструкций и перспективы использования средств обеспечения сплошности топлива на основе капиллярных сил. *Вісник Дніпропетровського ун-ту. Сер. Історія і філософія науки і техніки*. 2012. **20**. С. 160-164.

31. DeBrock S. C., Grove R. K. Capillary propellant management for integrated primary and secondary propulsion systems. *J. Spacecraft and Rockets*. 1975. **12**, № 5. P. 261-270. <https://doi.org/10.2514/3.56972>.

32. Сапожников В. Б., Крылов В. И., Новиков Ю. М., Ягодников Д. А. Наземная отработка капиллярных фазоразделителей на основе комбинированных пористо-сетчатых материалов для топливных баков жидкостных ракетных двигателей верхних ступеней ракет-носителей, разгонных блоков и космических аппаратов. *Инж. журн.: Наука и инновации*. 2013. Вып. 4. С. 1-15.

33. Tam W., Behruzi P., Jaekle D., Netter G. The Evolutionary forces and the design and development of propellant management devices for space flight in Europe and the United States. *Space Propulsion*. 2016. 25 p.

34. Tam W., Jaekle D. Review and history of ATK space systems surface tension PMD tanks. *Space Propulsion*. 2018. 24 p.

35. Hartwig J. W. Propellant Management Devices for Low-Gravity Fluid Management: Past, Present, and Future Applications. *J. Spacecraft and Rockets*. 2017. **54**, № 4. P. 808-824. <https://doi.org/10.2514/1.A33750>.

36. Levich V. G. *Physicochemical Hydrodynamics*. Prentice Hall, Inc., Englewood Cliffs, N. J., 1962. 700 p.

37. Jaekle D. E. Jr. Propellant Management Device Conceptual Design and Analysis: Vanes. *27th Joint Propulsion Conf.* (June 24-26, 1991, Sacramento, CA). AIAA/SAE/ASME/ASEE. 13. AIAA-91-2172. 12 p. <https://doi.org/10.2514/6.1991-2172>.

38. Jaekle D. E. Jr. Propellant Management Device Conceptual Design and Analysis: Sponges. *29th Joint Propulsion Conf. and Exhibit* (June 28-30, 1993, Monterey, CA). AIAA/SAE/ASME/ASEE. 13. AIAA-93-1970. 13 p. <https://doi.org/10.2514/6.1993-1970>.

39. Jaekle D. E. Jr. Propellant Management Device Conceptual Design and Analysis: Traps and Troughs. *31th Joint Propulsion Conf. and Exhibit* (July 10-12, 1995, San Diego, CA). AIAA/SAE/ASME/ASEE. 13. AIAA-95-2531. 13 p. <https://doi.org/10.2514/6.1995-2531>.

40. Jaekle D. E. Jr. Propellant Management Device Conceptual Design and Analysis: Galleries. *33th Joint Propulsion Conf. and Exhibit*. (July 6-9, 1997, Seattle, WA). AIAA/SAE/ASME/ASEE. 13. AIAA-97-2811. 13 p. <https://doi.org/10.2514/6.1997-2811>.

41. *Patent USA № 3353350*. Grove R. K., Collins W. S., DeBrock S. C. Sump for space vehicles. Declared 08.05.65; publ. 21.11.1967.

42. Седых И. В., Назаренко Д. С., Смоленский Д. Э. Особенности экспериментальной отработки процесса осаждения компонентов топлива в баках космических ступеней ракет. *Космич. техн. Ракетное вооружение*. 2019. № 2. С. 35-41. <https://doi.org/10.33136/stma2019.02.035>.

43. Blatt M. H., Audelott J. C. Centaur propellant acquisition system. *J. Spacecraft and Rockets*. 1976. **13**, № 9. P. 515-521.

44. Chato D. J. The role of flight experiments in the development of cryogenic fluid management technologies. *Cryogenics*. 2006. **46**, № 2–3. P. 82-88.

45. Kutter B., Zegler F., Sakla S., Wall J., Saks G., Duffey J., Hopkins J., Chato D. J. Settled Cryogenic Propellant Transfer. *AIAA Paper*. 2006. № 4436. 8 p.

46. Sakla S., Kutter B., Wall J. Centaur Test Bed (CTB) for cryogenic fluid management. *AIAA Paper*. 2006. № 4603. 5 p. <https://doi.org/10.2514/6.2006-4603>.

47. Gravlee M., Vera C., Wollen M., McLean C., Walls L. Micro-gravity cryogenic experiment opportunity. *AIAA Paper*. 2010. № 8838. 8 p. <https://doi.org/10.2514/6.2010-8838> .

48. DeBrock S. C. A survey of current developments in surface tension devices for propellant acquisition. *AIAA Paper*. 1970. № 685. P. 83-98. <https://doi.org/10.2514/3.30226> .

49. Гаркуша В. А., Шевченко Б. А., Рада Н. А., Овоц Н. А. Средства обеспечения сплошности компонентов топлива зарубежных космических летательных аппаратов. Обзор по материалам открытой печати за 1967-1981 гг. *Головной отдел научно-технической информации – 3, Сер. I*. 1983. № 229 (28). 44 с.

50. Ellion M. E., Trizell D. P., Mager E. An improved technique for propellant management for body stabilized spacecraft. *AIAA Paper*. 1977. № 850. 7 p. <https://doi.org/10.2514/6.1977-850> .

51. Fester D. A., Villars A. D., Uney P. E. Surface tension propellant acquisition system technology for Space Shuttle reaction control tanks. *AIAA Paper*. 1975. № 1196. P. 522-527. <https://doi.org/10.2514/3.57117> .

52. Regnier W. W., Hess D. A. Design and development of a passive propellant management system. *J. Spacecraft and Rockets*. 1978. **15**, № 5. P. 299-304.

53. Семенов Ю. П., Лозин-Лозинский Г. Е., Лапыгин В. Л., Тимченко В. А. *Многоразовый орбитальный корабль «Буран»*. М.: Машиностроение, 1995. 447 с.

54. Сєдих І. В. *Вибір проектних параметрів інерційних засобів забезпечення суцільності палива в баках космічних ступенів ракет-носіїв*: дис. канд. техн. наук. Дніпро: ДП «КБ «Південне», 2021. 214 с.

55. Новиков Ю. М., Большаков В. А. Комбинированные пористые сетчатые металлы. *Безопасность в техносфере*. 2010. № 5. С. 34-37.

56. Behruzi P., Dodd C., Netter G. Future Propellant Management Device Concepts for Restartable Cryogenic Upper Stages. *43th. Joint Propulsion Conf. & Exhibit* (8-11 July 2007, Cincinnati, OH). AIAA/ASME/SAE/ASEE. 8 p. <https://doi.org/10.2514/6.2007-5498> .

57. Behruzi P., Klatte J., Fries N., Netter G., Kranz T. Cryogenic Propellant Management during Ballistic Flight Phases. *48th Joint Propulsion Conf. & Exhibit* (30 July-01 August 2012, Atlanta, Georgia). AIAA/ASME/SAE/ASEE. 14 p. <https://doi.org/10.2514/6.2012-4047> .

58. Behruzi P., Klatte J., Fries N., Schütte A., Köhler H. Cryogenic Propellant Management Sounding Rocket Experiments on TEXUS 48. *49th Joint Propulsion Conf.* (July 14-17, 2013, San Jose, CA). AIAA/ASME/SAE/ASEE. 19 p. <https://doi.org/10.2514/6.2013-3904>.

59. Патент РФ № 2165871. Гришин В. М., Подобедов Г. Г., Перфильев Л. А. и др. Устройство для разделения жидкости и газа в условиях невесомости. Заявл. 17.04.2000, опубл. 27.04.2001.

60. *Standard specification for industrial woven wire cloth.* ASTM E 2016 – 20. 2020.

61. *Industrial woven wire cloth. Technical requirements and testing.* ISO 9044:2016.

62. Головкин М. П. *Товарознавство одяго-взуттєвих товарів: навч. посіб.* Харків: Харків. держ. ун-т харч. та торгівлі, 2015. 459 с.

63. ГОСТ 6613–86. *Сетки проволочные тканые с квадратными ячейками.* М.: Изд-во стандартов, 1986. 11 с.

64. *Standard guide for industrial woven wire filter cloth.* ASTM E 2814 – 18. 2018.

65. ГОСТ 3187–76. *Сетки проволочные тканые фильтровые.* М.: Изд-во стандартов, 1976. 6 с.

66. *Schemes of types weaving of mesh screen.* 2020. URL: <https://www.marcospecialtysteel.com/wire-mesh-crimp-and-weave-styles/> (Last accessed: 06.06.2023).

67. Chapter J. J., Rider S. B. Surface tension propellant management system computerized flow analysis. 16th Joint Propulsion Conf. *AIAA Paper.* 1980. № 1098. 8 p. <https://doi.org/10.2514/6.1980-1098> .

68. Schutze H. Strukturmechanische auslegung des triebstoffforderungssystems eines oberflachen spannungstanks. *Zeitschrift fur flugwissenschaft und weltraumforschung*. 1982. 6, № 3. P. 160-167.

69. Янке Е., Эмде Ф., Леш Ф. *Специальные функции*. М.: Наука, 1977. 344 с.

70. Позднишев М. О. *Проектування капілярних роздільників фаз систем запуску двигуна у невагомості з використанням деформованих сітчастих елементів*: дис. канд. тех. наук. Дніпро: Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, 2021. 179 с.

71. Джейкок М., Парфит Д. *Химия поверхностей раздела фаз*. М.: Мир, 1984. 269 с.

72. Оно С., Кондо С. *Молекулярная теория поверхностного натяжения в жидкостях*. М.: Изд-во иностранной литературы, 1963. 254 с.

73. Сердюк В. К. *Проектирование средств выведения космических аппаратов*. М.: Машиностроение, 2009. 504 с.

74. Адам Н. К., Толстой Д. М. *Физика и химия поверхностей*. М.-Л.: Изд-во технико-теорет. лит., 1947. 283 с.

75. Давыдов С. А. Физико-химические аспекты взаимодействия свободной поверхности жидкости с сетчатым разделителем фаз. *Системне проектування і аналіз характеристик аерокосмічної техніки*. 2009. 9. С. 20-30.

76. Hartwig J. W. Liquid acquisition devices for advanced in-space cryogenic propulsion systems. *Academic Press*. ISBN: 978-0-12-803989-2. 2016. 469 p. <https://doi.org/10.1016/C2014-0-03511-3>.

77. Аэров М. Э., Тодес О. М. *Гидравлические и тепловые основы работы аппаратов со стационарным и кипящим зернистым слоем*. Л.: Химия, 1968. 512 с.

78. Белов С. В. *Пористые металлы в машиностроении*. М.: Машиностроение, 1981. 247 с.

79. Хейфец Л. И., Неймарк А. В. *Многофазные процессы в пористых средах*. М.: Химия, 1982. 320 с.

80. Чизмаджев Ю. А. *Макрокинетика процессов в пористых средах*. М.: Наука, 1971. 362 с.
81. Eninger T. Capillary Flow Through Heat-Pipe Wick. *AIAA Paper*. 1975, № 75 (661). 29 p.
82. Abramson H. N. *The dynamic behavior of liquids in moving containers, with applications to space vehicle technology*. NASA SP-106, 1966. 384 p.
83. Franklin T. Dodge *The New «Dynamic Behavior of Liquids in Moving Containers»*. Southwest Research Institute. NASA, San Antonio, Texas. 2000. 195 p.
84. Де Брок С. С., Гроув Р. Г., Слоум и др. Системы подачи топлива, использующие силы поверхностного натяжения. *Вопросы ракетной техники*. 1972. №2. С. 34-49.
85. Идельчик И. Е. *Справочник по гидравлическим сопротивлениям*. М.: Машиностроение, 1992. 672 с.
86. *Исследование параметров сетчатых фазоразделителей после длительного пребывания в рабочих жидкостях*. ГП «КБ «Южное». Технический отчет. Днепр-ПСХ 35.21.18220.216 ОТ. 2016. 53с.
87. Fester D. A. *SS/RCS Subsystem Tension Propellant Acquisition: Expulsion Tankage Technology*. NASA CR-144412. 1975. 278 p.
88. Tegart J. R., Aydelott J. C. Effect of vibration on retention characteristics of screen acquisition systems. *Journal of Spacecraft and Rockets*. 1979. **16**, № 5. P. 319-325. <https://doi.org/10.2514/3.57665> .
89. Hess D. A., Regnier W. W. Design and Performance Verification of Passive Propellant Management for Body Stabilized Spacecraft. *14th. Joint Propulsion Conf. & Exhibit* (26-27 July 1978 Las Vegas, NV). AIAA/ASME/SAE/ASEE. 11 p. <https://doi.org/10.2514/6.1978-1029> .
90. Сичевой А. В., Давыдов С. А., Горелова К. В. Коэффициент динамического нагружения сетчатых средств обеспечения сплошности топлива. *Вісник Дніпропетровського ун-ту. Сер.: Системне проектування та аналіз характеристик аерокосмічної техніки*. 2010. **10**. С. 106-113.

91. Давыдов С. А. Экспериментальные исследования взаимодействия затопленной жидкостной струи с сетчатой разделительной перегородкой. *Вісник Дніпропетровського ун-ту. Сер.: Ракетно-космічна техніка*. 2003. 7. С. 45-56.

92. Давыдов С. А. Проникновение газа через сетчатые элементы системы обеспечения сплошности топлива космического ЛА. *Авиационно-космическая техника и технология*. 2006. 28, № 2. С. 80-86.

93. Давыдов С. А. Методика расчета удерживающей способности системы обеспечения сплошности топлива при импульсном изменении давления. *Авиационно-космическая техника и технология: двигатели и энергоустановки аэрокосмических летательных аппаратов*. 2006, № 6 (73). С. 62-65.

94. Давыдов С. А. Экспериментальные исследования влияния коэффициента упругости сетчатых разделителей фаз на их удерживающую способность. *Вісник Дніпропетровського ун-ту. Сер.: Ракетно-космічна техніка*. 2004. 8, №12. С. 11-17.

95. Давыдов С. А., Макарова А. С. Экспериментальная оценка влияния переменного давления на прорыв газа через металлическую сетку. *Всесоюзный институт научной и технической информации*. 1989, №2619 (В90). 11 с.

96. Давыдова А. В. Перепад давления на сетчатых элементах заборных устройств КЛА на переходных этапах работы двигательной установки. *Системне проектування та аналіз характеристик аерокосмічної техніки: зб. наук. пр. Дніпропетровського національного ун-ту*. 1998. 1. С. 103-106.

97. Давыдов С. О. Экспериментальне визначення динамічної утримуючої здатності сітчастих розділювачів фаз. *Системи озброєння і військова техніка: теоретичні основи розробки систем озброєння*. 2010, № 3 (23). С. 114-116.

98. Давыдов С. А. Методика определения динамической удерживающей способности сетчатых разделителей фаз. *Восточно-*

Европейский журнал передовых технологий: прикладная физика и материаловедение. 2010, № 6/5 (48). С. 51-54.

99. Давыдов С. А. Экспериментальные исследования влияния коэффициента упругости сетчатых разделителей фаз на их удерживающую способность. *Вісник Дніпропетровського ун-ту. Сер.: Ракетно-космічна техніка.* 2004. **8**, № 12. С. 11-17.

100. Давыдов С.А. Методика расчета коэффициента снижения удерживающей способности сетчатых разделителей фаз при увеличении их упругости. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий.* 2005, № 6/2 (18). С. 155-157.

101. Макарова А. С., Давыдов С. А., Абраменко Н. В., Работоспособность средств обеспечения сплошности топлива сетчатого типа в условиях ограниченного контакта с газом. *Системне проектування та аналіз характеристик аерокосмічної техніки: зб. наук. пр. Дніпропетровського національного ун-ту.* 2009. **9**. С. 62-68.

102. Давыдов С. А. Расчет снижения удерживающей способности средств обеспечения сплошности топлива при его движении вдоль поверхности раздела фаз. *Вестник Нац. техн. ун-та «ХПИ»: сб. науч. тр. Темат. вып.: Новые решения в современных технологиях.* 2010, №57. С. 96-100.

103. Давыдов С. А. Физико-химические аспекты взаимодействия свободной поверхности жидкости с сетчатым разделителем фаз. *Системне проектування та аналіз характеристик аерокосмічної техніки: зб. наук. пр. Дніпропетровського національного ун-ту.* 2009. **9**. С. 20-30.

104. Давыдова, А. В. Гидравлическое сопротивление сетчатых разделителей фаз в нестационарном потоке жидкости. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий.* 2014, № 4/7 (70). С. 25-29.

105. Давыдова А. В. Экспериментальные исследования коэффициента гидравлического сопротивления сетчатых разделителей фаз в нестационарном жидкостном потоке. *Авиационно-космическая техника и*

технология: проектирование аэрокосмических летательных аппаратов. 2015, № 4 (121). С. 10-15.

106. Позднышев Н. О. Гидродинамические характеристики сеток с измененной структурой плетения. *Системне проектування та аналіз характеристик аерокосмічної техніки: зб. наук. пр. Дніпропетровського національного ун-ту.* 2013. **15**. С. 75-80.

107. Pozdnyshev M. O., Davydov S. O. Experimental research on hydraulic resistance of deformed woven meshes. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu.* 2020, №. 5. P. 75-81. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2020-5/075>.

108. Pozdnyshev M. O. Mathematical model for determine of the mesh bubble point pore diameter. *Вісник Дніпровського ун-ту. Сер.: Ракетно-космічна техніка.* 2020. **28**, № 4. P. 143-151. <https://doi.org/10.15421/452019>.

109. Позднышев Н. О. Влияние деформированности структуры плетения сеток на проектные параметры сетчатых фазоразделителей. *Вісник Дніпропетровського ун-ту. Сер.: Ракетно-космічна техніка.* 2012. **20**, № 4. С. 227-236.

110. Jurns J.M., Hartwig J.W. Liquid oxygen liquid acquisition device bubble point tests with high pressure LOX at elevated temperature. *Cryogenics.* 2012. **52**. P. 283-289. <https://doi.org/10.1016/j.cryogenics.2012.01.022> .

111. Hartwig J. W., Darr S. Influential factors for liquid acquisition device screen selection. *Applied Thermal Engineering* 2014. **66** (1-2). P. 548-562. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.02.022> .

112. Hartwig J., Mann Jr. J. A predictive bubble point pressure model for porous liquid acquisition device screens. *Journal of Porous Media.* 2014. **17** (7). P. 587-600. <https://doi.org/10.1615/JPorMedia.v17.i7.30> .

113. Hartwig J. W., Chato, D. J., McQuillen J. B., et al. Screen channel liquid acquisition device outflow tests in liquid hydrogen. *Cryogenics.* 2014. **64**. P. 295-306. <https://doi.org/10.1016/j.cryogenics.2014.02.011> .

114. Hartwig J. W., Darr, S. R., McQuillen J. B., et al. A steady state pressure drop model for screen channel liquid acquisition devices. *Cryogenics*. 2014. **64**. P. 260-271. <https://doi.org/10.1016/j.cryogenics.2014.03.005> .
115. Hartwig J. W., McQuillen J. B., Chato D. J. Screen channel LAD bubble point tests in liquid hydrogen. *International Journal Hydrogen Energy*. 2014. **39** (2). P. 853-861. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.10.133> .
116. Hartwig J. W., Mann J. A., Darr S. R. Parametric analysis of the liquid hydrogen and nitrogen bubble point. *Cryogenics*. 2014. **63**. P. 25-36. <https://doi.org/10.1016/j.cryogenics.2014.05.013> .
117. Savas A. J., Hartwig J. W., Moder J. P. Thermal analysis of a cryogenic liquid acquisition device barrier under autogenous and non-condensable pressurization schemes. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2014. **74**. P. 403-413. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.03.036> .
118. Hartwig J. W., Mann J. A. Liquid transport in microgravity I: a predictive bubble point pressure model for porous LAD screens. *Journal of Porous Media*. 2014. **17** (7). P. 587-600. <https://doi.org/10.1615/JPorMedia.v17.i7.30> .
119. Hartwig J. W., Mann J. A. Liquid transport in microgravity II: bubble point pressures of binary methanol/water mixtures in fine-mesh screens. *AIChE Journal*. 2014. **60** (2). P. 730-739. <https://doi.org/10.1002/aic.14293> .
120. Hartwig J. W., McQuillen J. B. Screen channel liquid acquisition device bubble point tests in liquid methane. *International Journal Thermophys Heat Transfer*. 2015. **29** (2). P. 364-379. <https://doi.org/10.2514/1.T4078> .
121. Hartwig J. W., McQuillen J. B., Jurns J. M. Screen channel liquid acquisition device bubble point tests in liquid oxygen. *International Journal Thermophys Heat Transfer*. 2015. **29** (2). P. 353-363. <https://doi.org/10.2514/1.T3990> .
122. Hartwig J. W, McQuillen J. B., Chato D. J. Warm pressuring gas effects on the bubble point for cryogenic liquid acquisition devices. *International Journal Thermophys Heat Transfer*. 2015. **29** (2). P. 297-305. <https://doi.org/10.2514/1.T4259> .

123. Hartwig J. W. Screen channel liquid acquisition device bubble point tests in liquid nitrogen. *Cryogenics*. 2016. **74**. P. 95-105. <https://doi.org/10.1016/j.cryogenics.2015.09.008> .
124. Hartwig J. W., Kamotani Ya. The static reseal pressure model for cryogenic screen channel liquid acquisition devices. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2016. **99**. P. 31-43. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.03.103> .
125. Hartwig J. W., Kamotani Ya. The static bubble point pressure model for cryogenic screen channel liquid acquisition devices. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2016. **101**. P. 502-516. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.05.024> .
126. Kim S., Damle N., Mudawar I., Hartwig J. Cryogenic flow boiling in microgravity: Effects of reduced gravity on two-phase fluid physics and heat transfer. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2024. **218**. P. 1-35. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2023.124751> .
127. Darr S. R., Camarotti C. F., Hartwig J. W., and Chung J. N. Hydrodynamic model of screen channel liquid acquisition devices for in-space cryogenic propellant management. *Physics of fluids*. 2017. **29** (1). P.1-18. <https://doi.org/10.1063/1.4973671> .
128. Camarotti C., Deng O., Darr S., Hartwig J., and Chung J. Screen Compliance Experiments for Application of Liquid Acquisition Device in Space. *Microgravity Science and Technology*. 2019. **31**. P.109-122. <https://doi.org/10.1007/s12217-018-9671-0> .
129. Camarotti C., Deng O., Darr S., Hartwig J., and Chung J. Room temperature bubble point, flow-through screen, and wicking experiments for screen channel liquid acquisition devices. *Applied Thermal Engineering*. 2019. **149**. P. 1170-1185. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.12.111> .
130. Hartwig J., Johnson W., Bamberger H. et al. NASA Glenn Research Center Creek Road Cryogenic Complex: Testing between 2005–2019. *Cryogenics*. 2020. **106**. P. 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.cryogenics.2020.103038> .

131. Hartwig J. W. *Liquid acquisition devices for advanced in-space cryogenic propulsion system*. Dissertation For the degree of Doctor of Philosophy Department of Mechanical and Aerospace. 2014. 777 p.
132. Kim S., Foster D., Damle N., Mudawar I., Hartwig J. Experimental investigation of flow orientation effects on cryogenic flow boiling. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2024. **220**. P. 1-37. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2023.124940> .
133. Castle J. N. *Heat Transfer Effects on Bubble Point Tests in Liquid Nitrogen*. MDCG2653 (McDonnell Douglas Company). 1972. 74 p.
134. Meserole J. S., Jones O. S. Pressuring effects on cryogenic liquid acquisition devices. *Journal Spacecraft Rockets*. 1993. **30** (2). P. 236-243. <https://doi.org/10.2514/3.11536> .
135. Cady E. C. *Study of Thermodynamic Vent and Screen Baffle Integration for Orbital Storage and Transfer of Liquid Hydrogen*. Final Report, NASA-CR-134482. 1973. 213 p.
136. Burge G. W., Blackmon J. B., Castle J. N., Design of propellant acquisition systems for advanced cryogenic space propulsion systems. *Propulsion Conference* (5-7 November, 1973, Las Vegas, NV). AIAA/SAE. 12 p. <https://doi.org/10.2514/6.1973-1287> .
137. Paynter H. L. *Acquisition/Expulsion System for Earth Orbital Propulsion System. Volume V: Cryogenic Test*. NASA-CR-134157. 1973. 242 p.
138. Burge G. W., Blackmon J. B. *Study and Design of Cryogenic Propellant Acquisition Systems. Volume II: Supporting Experimental Program*. NASA-CR-120301. 1973. 110 p.
139. Cady E. C. *Design and Evaluation of Thermodynamic Vent/Screen Baffle Cryogenic Storage System*. NASA-CR-134810. 1975. 167 p.
140. Bingham P. E., Tegart J. R. Wicking in Fine Mesh Screens. *AIAA-P-77-849, 13th Propulsion Conference* (11-13 July, 1977, Orlando, FL). 9 p. <https://doi.org/10.2514/6.1977-849> .

141. Cady E. C. *Effect of Transient Liquid Flow on Retention Characteristics of Screen Acquisition Systems*. NASA-CR-135218. 1977. 217 p.
142. Simon E. D. Environmental Requirements for Bubble Pressure Tests on Fine- Mesh Screens. *Journal Spacecraft Rockets*. 1979. **16** (4). P. 218-222. <https://doi.org/10.2514/3.57647> .
143. Wilson A. C., Meserole J. S. *Liquid Hydrogen Acquisition Device Component Fabrication and Testing*. NASA D180-29345-1, Boeing Company. 1986. 117 p.
144. Jurns J. M., McQuillen J. B., Gaby J. D., Sinacore S. A. *Bubble Point Measurements with Liquid Methane of a Screen Channel Capillary Liquid Acquisition Device*. NASA/TM-2009-215494. 2009. 24 p.
145. Paynter H. L. *Acquisition/Expulsion System for Earth Orbital Propulsion System. Volume III: Cryogenic Test*. NASA-CR-134155. 1973. 277 p.
146. Kudlac M. T., Jurns J. M. Screen channel liquid devices for liquid oxygen. *42nd Joint Propulsion Conference* (9-12 July, 2005, Sacramento, CA). AIAA/ASME/SAE/ASEE. 9 p. <https://doi.org/10.2514/6.2006-5054>.
147. Jurns J. M., McQuillen J. B. Liquid acquisition device testing with sub-cooled liquid oxygen. *44th Joint Propulsion Conference* (21-23 July, 2008, Hartford, CT). AIAA/ASME/SAE/ASEE. 11 p. <https://doi.org/10.2514/6.2008-4943>.
148. Chato D. J., Kudlac M. T. *Screen channel liquid acquisition devices for cryogenic propellants*. NASA/TM-2005-213638. 2005. 7 p.
149. Paynter H. L. *Investigation of Space Storable Propellant Acquisition Devices. Volume II: Final Report*. NASA-CR-111343. 1970. 166 p.
150. Conrath M., Dreyer M. Gas separation and bubble behavior at a woven screen. *Proceedings of ITP2009 Interdisciplinary Transport Phenomena VI: Fluid, Thermal, Biological, Materials and Space Sciences* (4-9 October, 2009, Volterra, Italy). 9 p.
151. Balzer D. L., Barksdale T. R., Bowman T. E., et al. *Advanced Propellant Management System for Spacecraft Propulsion Systems. Phase 2 – Detail Design*. NASA-CR-101913. 1969. 140 p.

152. Heckman B. R. *Bubble Point Characteristics of Multi-Layer Screen Elements*. MDC-02656 (McDonnell Douglas Astronautics Company, Huntington Beach, CA). 1971. 13 p.

153. Dodge F. T., Bowles E. B. Vapor Flow into a Capillary Propellant-Acquisition Device. *Journal Spacecraft Rockets*. 1984. **21** (3). P. 267-273. <https://doi.org/10.2514/3.25648> .

154. Позднышев Н. О. Экспериментальное определение капиллярного радиуса ячеек сеток с деформированной структурой плетения. *Вісник Дніпропетровського ун-ту. Сер.: Ракетно-космічна техніка*. 2018. **26**, № 4. С. 93-97.

155. Blatt M. A. *Low gravity propellant control using capillary devices in large scale cryogenic vehicles*. NASA-CR-102902. 1970. 56 p.

156. Blatt M. H., Start J. A., Siden L. E. *Low Gravity Propellant Control Using Capillary Devices in Large Scale Cryogenic Vehicles. Design Handbook*. N71-10602. NASA-CR-102901. 1970. 138 p.

157. Blatt M. A. *Low gravity propellant control using capillary devices in large scale cryogenic vehicles. Phase II final report*. NASA-CR-114104. 1970. 225 p.

158. Armour J. C., Cannon J. N. Fluid flow thorough woven screens. *AIChE Journal*. 1968. **4**, № 3. P. 415-420. <https://doi.org/10.1002/aic.690140315> .

159. Burge G. W., Blackmon J. B. *Study and Design of a Cryogenic Propellant Acquisition System, 3rd Quarterly Progress Report*. MDC G2940 (McDonnell Douglas Astronautics Co.). 1972. 147 p.

160. Ludewig M., Omori S., Rao G. *Pressure drop across woven screens under uniform and nonuniform flow conditions*. NASA-CR-120559 (Alabama Univ.). 1974. 143 p.

161. Rollins J. R., Grove R. K. and Hobbs L. U. Design and qualification of the EUROSTAR propellant tank. *22nd Joint Propulsion Conference*. 1986. № 1659. 9 p. <https://doi.org/10.2514/6.1986-1659> .

162. Azizi F. On the pressure drop of fluids through woven screen meshes. *Chemical Engineering Science*. 2019. **207**. P. 464-478. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2019.06.046>.

163. Okolo P. N., Zhao K., Kennedy J., Bennett G. J. Numerical Modeling of Wire Screens for Flow and Noise Control. *23rd Aeroacoustics Conference*. AIAA/CEAS. 2017. 20 p. <https://doi.org/10.2514/6.2017-3700>.

164. Okolo P. N., Zhao K., Neri E., Kennedy J., Bennett G. J. Mesh screen application for noise reduction of landing gear strut. *22nd Aeroacoustics Conference*. AIAA/CEAS. 2016. 12 p. <https://doi.org/10.2514/6.2016-2845>.

165. Yershin S. A. Experimental Study of Channel Flow with Porous Walls. *Paradoxes in Aerohydrodynamics*. 2017. P. 149-173. https://doi.org/10.1007/978-3-319-25673-3_6.

166. Yoshida Y., Inoue Y., Shimosaka A., Shirakawa Y., Hidaka J. Numerical Simulation of Flow Resistivity of Metal Woven Mesh. *Journal of Chemical Engineering of Japan*. 2015. **48**, № 7. P. 545-555. <https://doi.org/10.1252/jcej.14we148>.

167. Альтшуль А.Д. *Гидравлические сопротивления*. М.: Недра. 1982. 317 с.

168. Мінай О. М. Проблематика реалізації космічних проектів з використанням криогенних двигательних установок многократного запуску. *Матеріали XVI наукових читань «Дніпровська орбіта»*. 2021 р. С. 114-122.

169. Siedykh I. V., Minai O. M. Reorientation of fuel components to ensure restarting of the main engine: calculation methods, numerical simulation and experimental testing. *71-st International Astronautical Congress (2020. London)*. Conference Paper, IAC-20,A2,3,5. – 10 p.

170. Сарнер С. *Химия ракетных топлив*. М.: Мир. 1969. 488 с.

171. Большаков Г. Ф. *Химия и технология компонентов жидкого ракетного топлива*. Л.: Химия. 1983. 320 с.

172. Богословский С. В. *Физические свойства газов и жидкостей*. Санкт-Петербург: 2001. 73 с.

173. Зрелов В. Н., Серегин Е. П. *Жидкие ракетные топлива*. М.: Химия. 1975. 320 с.
174. Адам Н. К. *Физика и химия поверхностей*. Л.: Государственное издательство технико-теоретической литературы. 1947. 552 с.
175. Браткова А. А. *Химотология ракетных топлив и реактивных топлив*. М.: Химия. 1987. 304 с.
176. Reynolds W. C., Saad M. A. and Satterlee H. M. Capillary Hydrostatics and Hydrodynamics at Lo g. T.R. LG-3. *Mechanical Engineering Dept.*, (Stanford University, Stanford, California, September). 1964. 38 p.
177. *Summary Report: Studies of Interfacial Surface Energies*. NASA CR-54175 (Harris Research Laboratories, Rockville, Maryland, December). 1964. 182 p.
178. Alexander G. E., Barksdale T. R. *Final Report Volume 11: Experimental Investigation of Capillary Propellant Control Devices for Low Gravity Environments*. NASA CR-110755. (George C. Marshall Space Flight Center, Alabama, June). 1970. 151 p.
179. Schwartz A. M., Ellison A. H. *Summary Report: The effect of surface contamination on contact angles and surface potentials*. NASA CR-54708. (Harris Research Laboratories, Rockville, Maryland, January 13). 1966. 43 p.
180. Маликов В. Г., Комисарик С. Ф., Коротков А. М. *Наземное оборудование ракет*. М.: Воениздат. 1971. 304 с.
181. Uney P. E. and Fester D. A. *Material compatibility with space storable propellants. Design Guidebook*. NASA-CR-127057 1972. 129 p.
182. Torrance P. R., Lyndon B. *Saturation Point model for the formation of metal nitrate in nitrogen tetroxide oxidizer*. NASA-TP-3107. 1991. 22 p.
183. Michael F., Norman L., Simon A., et al. Corrosion of T1-6A1-4V alloy and 304L stainless steel in liquid nitrogen oxides. *Journal of Propulsion and Power*. 1996. P. 48-54. <https://doi.org/10.2514/3.23989>.
184. Halsch J., Keil H. *Новые методы исследования явления уменьшения скорости потока N_2H_4 как окислителя ЖРД для ДМТ*. Перевод с англ. 1986. 12 p.

185. Росс Д. Четырехокись азота как окислитель в ракетной технике. *Вопросы ракетной техники*. 1951 г. №1. С. 118-123.
186. *Отчет об опытно-конструкторской работе «Анализ опыта заправок-сливов на высококипящих компонентах топлива (Амил, Гептил)»*. Санкт-Петербург: ФГУП «РНЦ «Прикладная химия». 2005. 46 с.
187. Mason D. M., Taylor L. L., Rittenhouse J. B. *Corrosion*. 1957. **13**, № 12. 55-62 p.
188. Mason D. M., Rittenhouse J. B. *Corrosion*. 1958. **14**, № 7. 59-62 p.
189. Паушкин Я. М. *Химия реактивных топлив*. М.: Изд-во АН СССР. 1962. 436 с.
190. Володарский Е. Т., Малиновский Б. Н., Туз Ю. М. *Планирование и организация измерительного эксперимента*. К.: Вища школа. Головное издательство. 1987. 280с.
191. Деденко Л. Г., Керженцев В. В. *Математическая обработка и оформление результатов эксперимента: в лабораториях общего физического практикума*. М.: Изд-во Моск. гос. ун-та, 1977. 111 с.
192. Сєдих І. В., Мінай О.М. Визначення впливу числа Бонда на рух рідини при виконанні маневру переорієнтації за допомогою чисельного моделювання. *II Міжнародній науково-технічній конференції «Динаміка, міцність та моделювання в машинобудуванні» (05-08 жовтня 2020, Харків)* С. 272-276.
193. Мінай О. М., Кузьміч І. Ю. Застосування методів CFD моделювання при оптимізації конструкції забірних пристроїв у паливних баках ракет-носіїв. *Авіація в ХХІ столітті: зб. тез X Всесвітній конгрес – «Безпека в авіації та космічні технології» (28-30 вересня, 2022, Київ)*. С. 1-5.
194. Смоленський Д. Е., Мінай О. М., Гоман О.Г. Числове моделювання процесу зливу компонентів палива з баку. *Комп'ютерна гідромеханіка: зб. тез VIII Міжнар. наук.-практич. конф. (27-28 вересня 2022, Київ)*. С. 78.

195. Мінай О. М. Експериментальне визначення зміни капілярної утримної здатності сітчастих розділювачів фаз. *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. 2023. № 6 (192). С. 55-65. <https://doi.org/10.32620/aktt.2023.6.07>.

196. Минай А. Н., Седых И. В., Кузьмич И. Ю. Применение методов численного моделирования при экспериментальной отработке заборных устройств центрального типа. *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. 2019. №6 (158). С. 33-41. <https://doi.org/10.32620/aktt.2019.6.05>.

197. Седых И. В., Назаренко Д. С., Минай А. Н., Бабийчук Я. О. Экспериментальное определение времени осаждения топлива в сферическом баке перед повторным включением маршевого двигателя. *Системне проектування та аналіз характеристик аерокосмічної техніки: зб. наук. пр.* 2019. 17. С. 136-144. <https://doi.org/10.15421/471933>.

198. Антропов Л. И. *Теоретична електрохімія*. К.: Либідь.1993. 544 с.

199. Розенфельд И. Л. *Ингибиторы коррозии*. М.: Химия. 1977. 350 с.

200. Жук Н. П. *Курс коррозии и защиты металлов*. М.: Металлургия, 1976. 472 с.

201. Клинов И. Я. *Коррозия химической аппаратуры и коррозионностойкие материалы*. М.: МАШГИЗ. 1954. 407 с.

202. Шрайер Л. Л. *Коррозия*. М.: Металлургия. 1981. 632 с.

203. Годт Ф. *Коррозия и защита от коррозии*. М.: Химия, 1966. 848 с.

204. Антропов Л. И. *Ингибиторы коррозии металлов*. Киев: Техніка. 1981. 183 с.

205. Мінай О. М. Швидкість корозійних процесів та їх вплив на зміну структурних і геометричних параметрів сітчастих розділювачів фаз. *Космічні горизонти: зб. тез 3-ї наук.-практ. інтер.- конф. Випуск №2*. 2023. С. 36-40.

206. Мінай О. М. Визначення швидкості корозії основного конструкційного матеріалу сіток капілярних розділювачів фаз. *Авіаційно-космічна техніка й технологія*. 2024. № 1 (193). С. 43-55. <https://doi.org/10.32620/aktt.2024.1.04>.

207. Сітка ткани з квадратними осередками мікронних розмірів. Технічні умови. ТУ 14-4-507-99 (Утримувач оригіналу ВАТ «Сонячногірський завод металевих сіток ЛЕПСЕ»). 1999. С. 2.

208. Minai O., Ivanov O., Siedykh I. Influence of long-term stays of elements of capillary intake devices in liquid propellant components on their parameters. *Aerospace Research in Bulgaria*. 2020. **32**. P. 175-192. <https://doi.org/10.3897/arb.v32.e15> .

209. Мінай О. М. Зміна капілярної утримної здатності засобів забезпечення суцільності палива в наслідок їх тривалого терміну експлуатації. *Вісник Дніпропетровського ун-ту. Сер.: Ракетно-космічна техніка*. 2023. **31**. С. 58-73. <https://doi.org/10.15421/452306> .

210. Minai O., Kuzmich I. Choice of the optimum design of lateral PMD using the CFD method. *Aerospace Research in Bulgaria*. 2023. **35**. P. 128-144. <https://doi.org/10.3897/arb.v35.e13> .

211. Minai O. M. Using mathematical modeling with experimental validation for the development of propellant continuity assurance equipment. *72-st International Astronautical Congress (25-29 October, 2021. Dubai)*. Technical Presentation and Conference Paper IAC– 21,A2,2,11. – 10 p.

212. Мінай О.М. Вплив на капілярну утримну здатність сітчастих роздільників фаз їх тривалого перебування у компонентах ракетного палива. *Людина і космос: зб. тез XXV Міжнарод. молодіж. наук.-практ. конф.* (12-14 квітня 2023, Дніпро). С. 122-123.

213. Minai O.M. Prediction of performance of mesh phase separators in GEO satellite capillary intake devices. *74-st International Astronautical Congress.* (02-06 October, 2023, Baku, Azerbaijan). Technical Presentation and Conference Paper IAC – 23,A2,4,4x76632 – 10 p.

214. Седов Л. И. *Методы подобия и размерности в механике*. М.: Наука, 1977. 440 с.

215. Fouad A. On the pressure drop of fluids through woven screenmeshes. *Chemical engineering science*. 207. 2019. P. 464-478. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2019.06.046> .

216. Экспериментальное подтверждение выбранного метода крепления и очистки сетки капиллярного стабилизатора баков окислителя и горючего 3-й ступени РН «Циклон-4». ГП «КБ «Южное». Технический отчет. 2Ц4С3.21.16258.216 ОТ. 2009. 23с.

217. Котерев В. А., Щипунов Ю. М. *Возможности использования поверхностных сил жидких топлив в системах питания двигателей в условиях невесомости*. Технический отчет №341. ЛИИ. 1967. 41с.

218. Уорисне А., Геффнер Дж. *Методы обработки экспериментальных данных*. 1949. 364 с.

219. Fester D. A., Villars A. S., Uney P. E., Surface tension propellant acquisition system technology for Space Shuttle reaction control tank. *11th Propulsion conference*. AIAA/SAE. 1974. 8 p.

220. Минай А. Н., Седых И. В., Кузьмич И. Ю. Применение методов численного моделирования при экспериментальной отработке заборных устройств баков ракет-носителей с центральным отбором компонентов топлива. *Сучасні розрахунково-експериментальні методи визначення характеристик ракетно-космічної техніки: науково-практична конференція, зб. тез*. 2019. С. 29-30.

221. Мінай О. М., Петренко Р. М. Визначення динамічної складової гідравлічного залишку за допомогою методів чисельного моделювання. *Людина і космос: зб. тез XXIV Міжнарод. молодіж. наук.-практ. конф.* (25-27 квітня 2022, Дніпро). С. 139.

222. Кузьмич І. Ю., Мінай О.М. Влияние диджитализации на процессы проектирования и экспериментальной отработки в ракетно-космической отрасли на примере капиллярного заборного устройства. *Матеріали XVI наукових читань «Дніпровська орбіта»* (28-30 жовтня 2021, Дніпро). С. 162-169.

223. Кузьміч І. Ю., Мінай О. М. Вибір оптимальної конструкції забірною пристрою у баку пального першого ступеню ракети-носія «Циклон-4». *Авіаційно-космічна техніка й технологія*. 2022. №1 (177). С. 25-33. <https://doi.org/10.32620/aktt.2022.1.03>.

224. *Разработка средств обеспечения сплошности, обеспечивающих многократный запуск ДУ на низкокипящих КТ в условиях орбитального полета*. ГП «КБ «Южное». Технический отчет. НТРП.216/174-2021 ОТ. 2021. 76с.

225. *Средства обеспечения сплошности при питании ЖРД МТ и маршевого двигателя 3-й ступени РН "Циклон-4" из основных баков*. ГП «КБ «Южное». Технический отчет. «Циклон-4».21.15113.216 ОТ. 2005. 151с.

ДОДАТОК А
ДОКУМЕНТИ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ
РОБОТИ

ЗАТВЕРДЖУЮ

Генеральний конструктор – перший
заступник Генерального директора
ДП «КБ «Південне» ім. М.К. Янгеля



М. О. Дегтярьов.

“ 19 01 2024 р.


АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

результатів дисертаційної роботи Міная Олександра Миколайовича
на здобуття наукового ступеня доктор філософії
**«Залежність проектних параметрів капілярних засобів забезпечення
суцільності палива від терміну їх експлуатації»**

Результати досліджень Міная Олександра Миколайовича, що представлені в дисертаційній роботі «Залежність проектних параметрів капілярних засобів забезпечення суцільності від терміну їх експлуатації», у вигляді методичних та практичних результатів застосовуються у ДП «КБ «Південне» ім. М.К. Янгеля при проведенні робіт з розробки перспективних ракет-носіїв, а саме:

1) Розроблені методики вибору проектних параметрів капілярних систем забезпечення суцільності палива з сітчастими розділювачами фаз, використовуються при створенні нових перспективних космічних ступенів ракет-носіїв в рамках проведення робіт по НТРП;

3) Результати дисертаційної роботи, а саме математичні моделі, методики та рекомендації, було використано під час розрахунків з визначення гідродинамічних характеристик сітчастих елементів при проектуванні капілярних систем забезпечення суцільності компонентів палива у невагомості в баках верхніх ступенів ракет-носіїв сімейства «Циклон» і перспективних космічних літальних апаратів та їх окремих систем.

Заступник Генерального конструктора
з конструювання і супроводження
конструкцій – головний конструктор
і начальник КБ-2  С. І. Шевцов

Начальник ЛСНД-216



Д. Е. Смоленський

ЗАТВЕРДЖУЮ

Проректор з наукової роботи
Дніпровського національного
університету імені Олеся Гончара,
доцент

Олег МАРЕНКОВ

“ ” _____ 2024 р.

АКТ


впровадження дисертаційного дослідження аспіранта PhD
Міная Олександра Миколайовича у навчальний процес
Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара

Науково-методична комісія фізико-технічного факультету Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара у складі голови – доктора технічних наук, професора Саніна А.Ф. та членів комісії: доктора технічних наук, професора Дроня М.М., кандидата технічних наук, доцента Шевцова В.Ю., констатує, що результати досліджень і розробки, які відображені в дисертаційній роботі Міная Олександра Миколайовича на здобуття наукового ступеня доктора філософії (PhD) «Залежність проектних параметрів засобів забезпечення суцільності палива від терміну їх експлуатації», використовуються при проведенні лекційних, практичних та лабораторних занять, що викладаються у відповідності з навчальними програмами дисципліни «Проектування ракетно-космічних комплексів. Засоби виведення», «Відпрацювання ракетно-космічних комплексів», «Проектування систем живлення літальних апаратів», а також при підготовці дипломних та курсових робіт студентів спеціальності 134 – «Авіаційна та ракетно-космічна техніка».


Автором вирішені науково-технічні задачі: по визначенню швидкості корозії основного конструкційного матеріалу сітчастих розділювачів фаз капілярних засобів забезпечення суцільності палива і по визначенню зміни основних проектних параметрів сітчастих розділювачів фаз, внаслідок їх тривалого терміну експлуатації в хімічно агресивних компонентах ракетних палив.

Застосування вказаних розробок в навчальному процесі дозволило підвищити якість курсів, що викладаються.

Голова комісії

 Анатолій САНІН

Члени комісії:

 Микола ДРОНЬ

 Василь ШЕВЦОВ

ДОДАТОК Б
РЕЗУЛЬТАТИ ВИМІРЮВАННЯ ГЕОМЕТРИЧНИХ РОЗМІРІВ
ЗРАЗКІВ СІТОК СІТЧАСТИХ РОЗДІЛЮВАЧІВ ФАЗ ОПТИЧНИМ
МЕТОДОМ

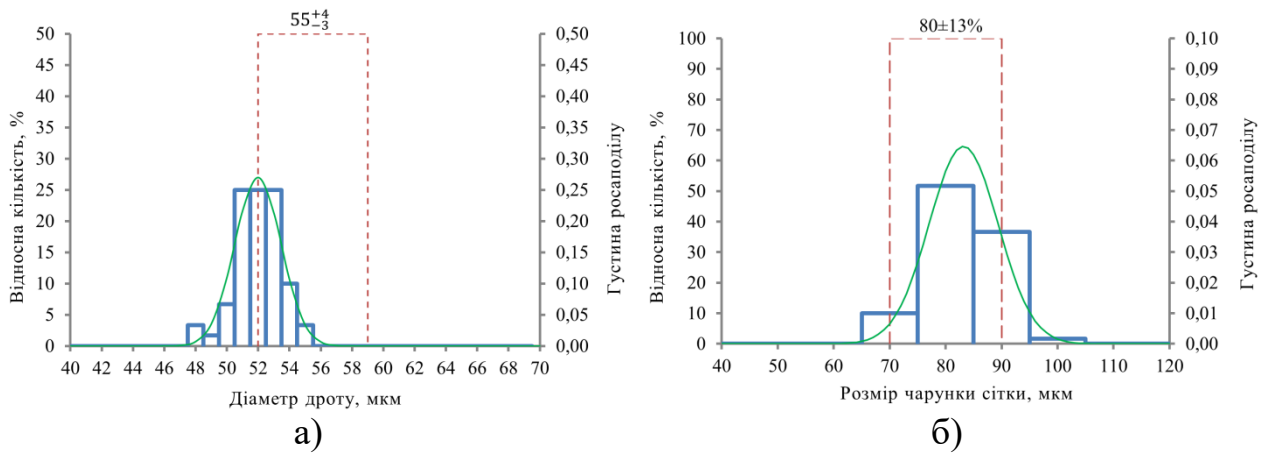


Рис. 1. Результати вимірів геометричних розмірів СРФ 1 з КЗ №8 (термін перебування в рідкій фазі АТ – 14 років): а) – товщини дроту; б) – розміри чарунок

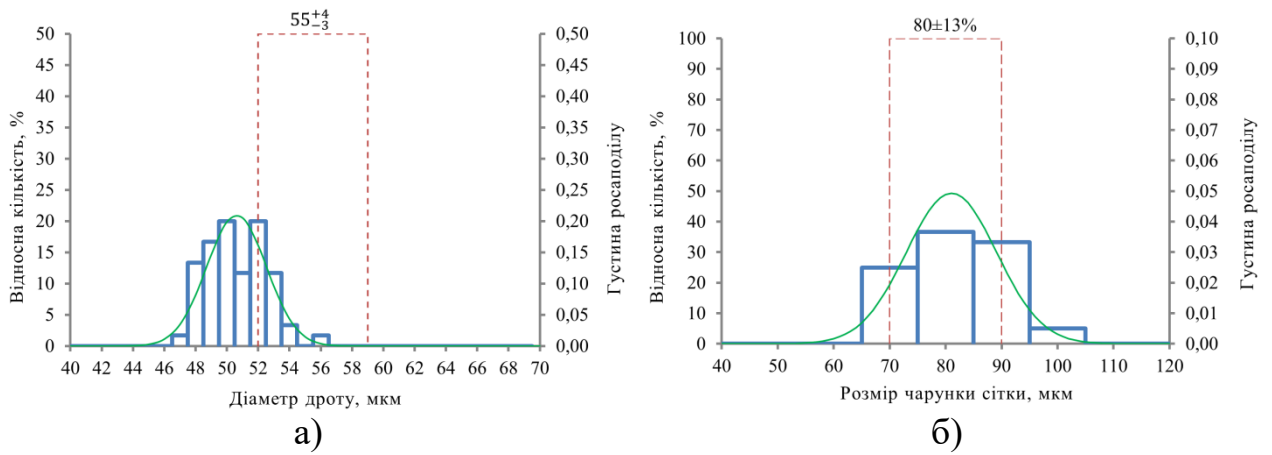


Рис. 2. Результати вимірів геометричних розмірів СРФ 2 з КЗ №8 (термін перебування в рідкій фазі АТ – 14 років): а) – товщини дроту; б) – розміри чарунок

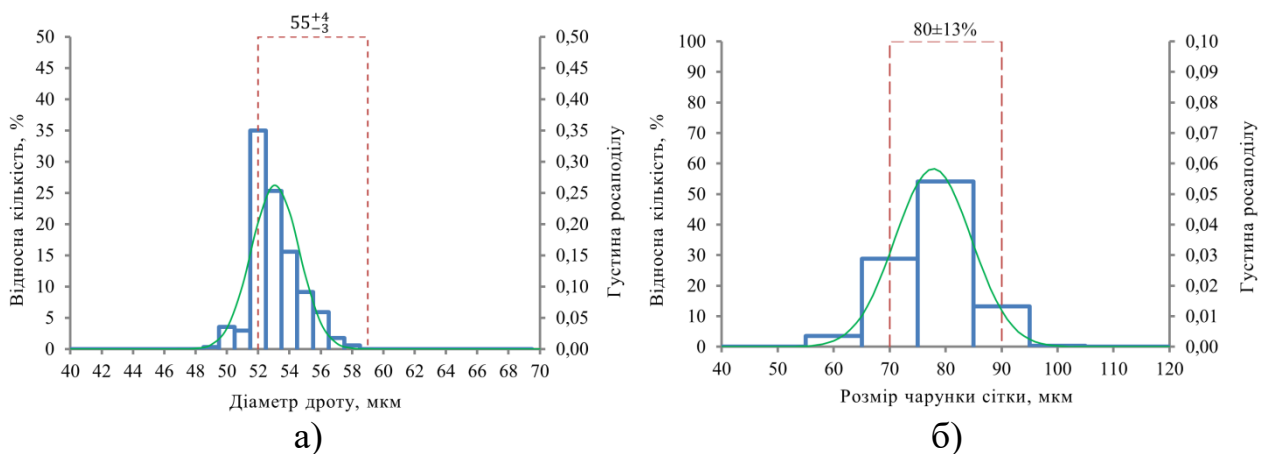


Рис. 3. Результати вимірів геометричних розмірів СРФ 3 з КЗ №8 (термін перебування під парами АТ – 14 років): а) – товщини дроту; б) – розміри чарунок

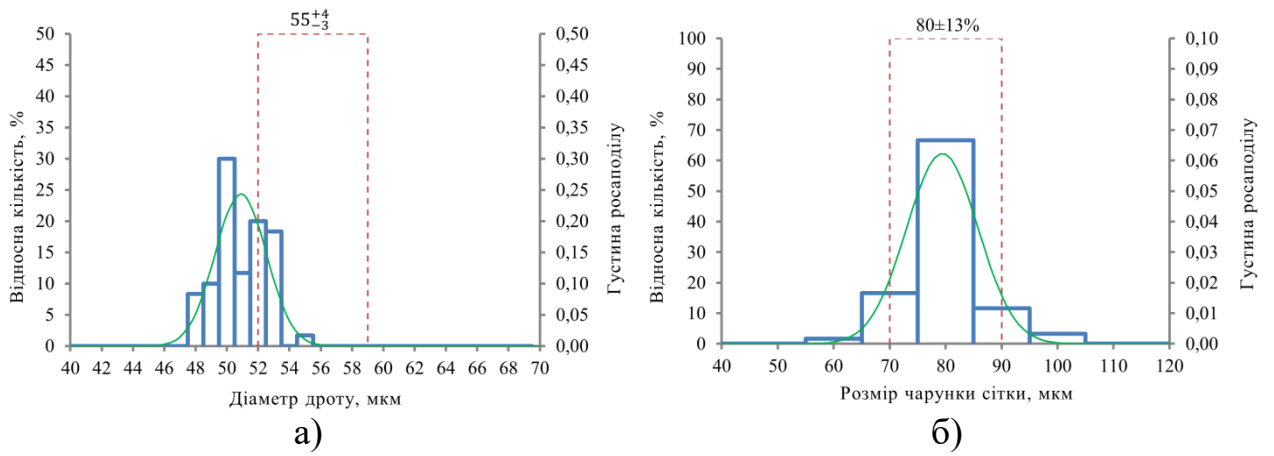


Рис. 4. Результати вимірів геометричних розмірів СРФ 1 з КЗ №8 (термін перебування в рідкій фазі НДМГ – 14 років): а) – товщини дроту; б) – розміри чарунок

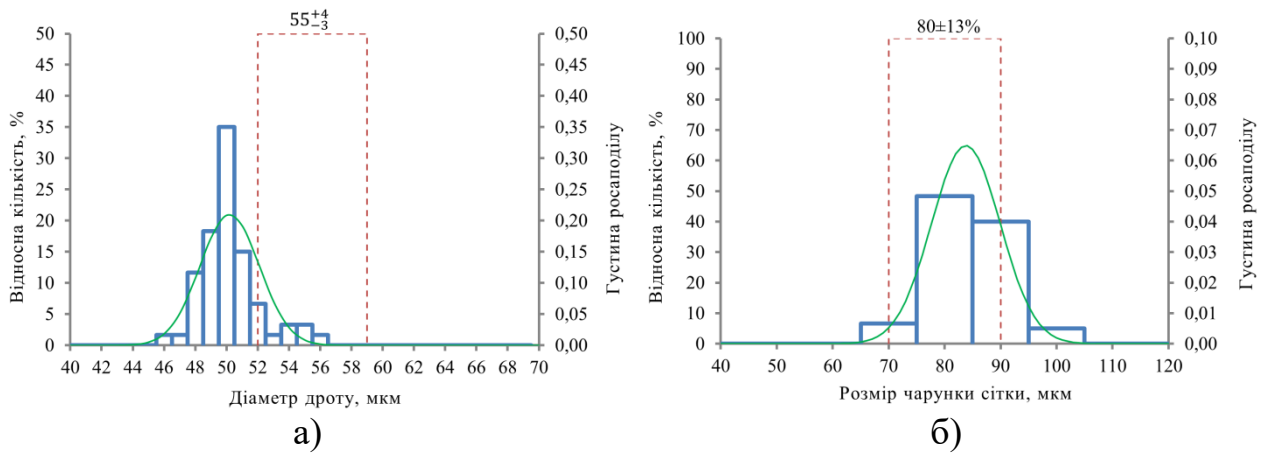


Рис. 5. Результати вимірів геометричних розмірів СРФ 2 з КЗ №8 (термін перебування в рідкій фазі НДМГ – 14 років): а) – товщини дроту; б) – розміри чарунок

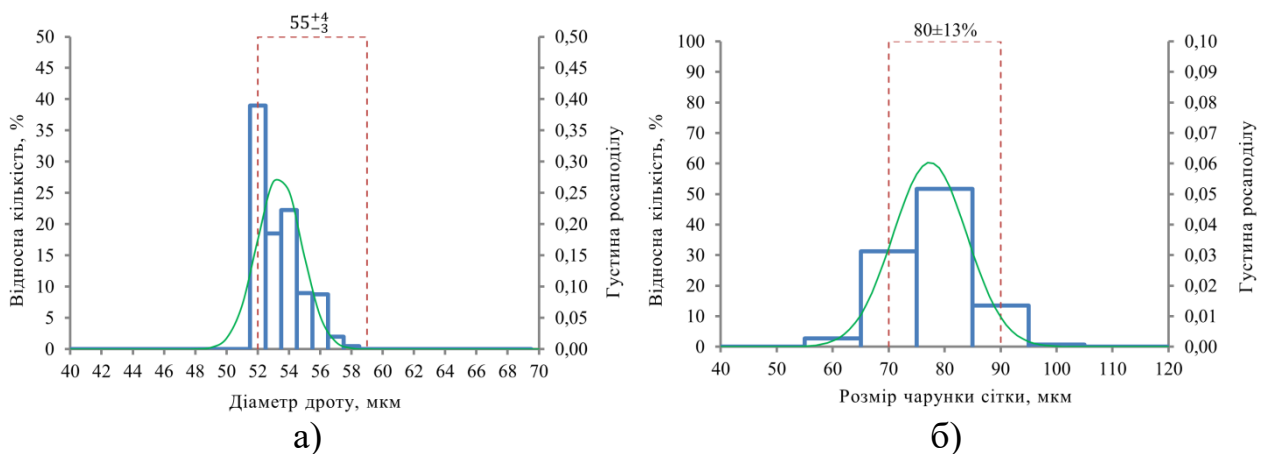


Рис. 6. Результати вимірів геометричних розмірів СРФ 3 з КЗ №8 (термін перебування під парами НДМГ – 14 років): а) – товщини дроту; б) – розміри чарунок

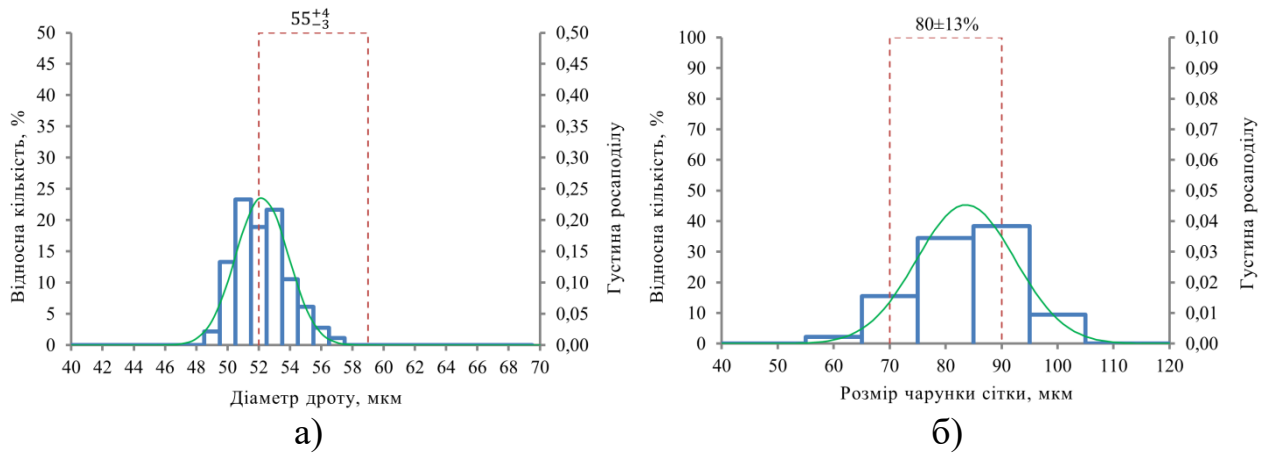


Рис. 7. Результати вимірів геометричних розмірів СРФ 1 з КЗ №9 (термін перебування в рідкій фазі АТ – 15 років): а) – товщини дроту; б) – розміри чарунок

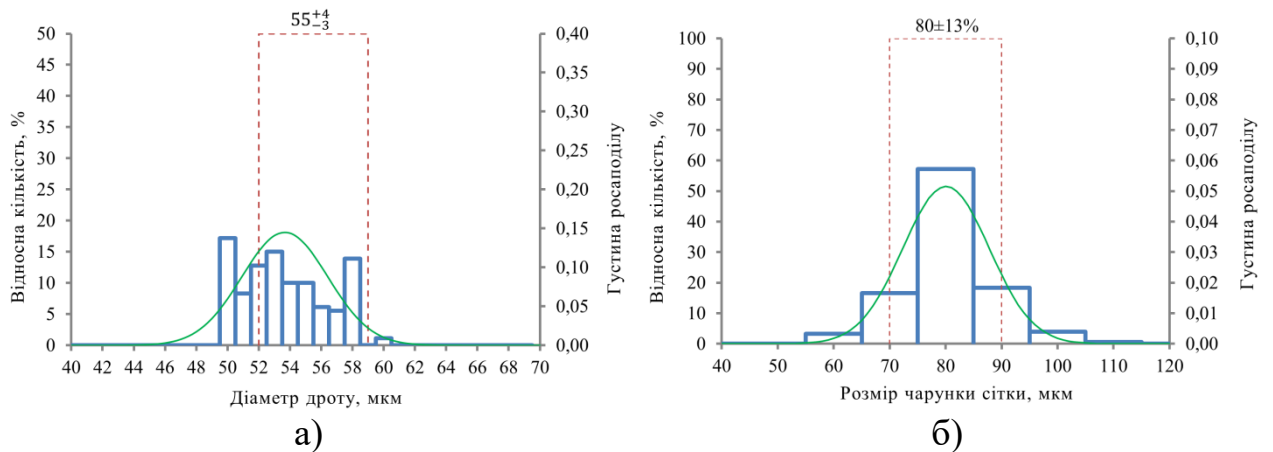


Рис. 8. Результати вимірів геометричних розмірів СРФ 2 з КЗ №9 (термін перебування в рідкій фазі АТ – 15 років): а) – товщини дроту; б) – розміри чарунок

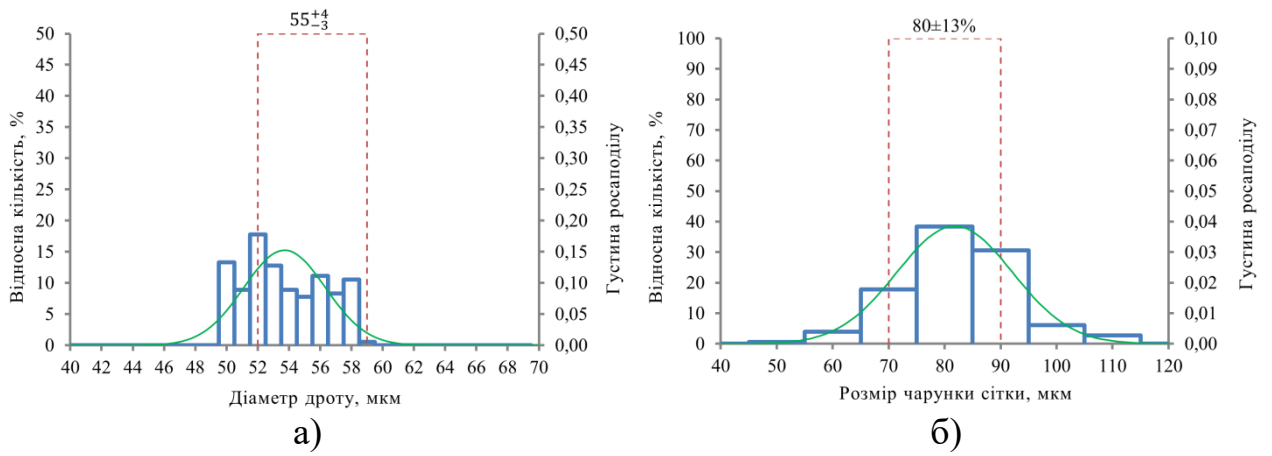


Рис. 9. Результати вимірів геометричних розмірів СРФ 1 з КЗ №9 (термін перебування в рідкій фазі НДМГ – 15 років): а) – товщини дроту; б) – розміри чарунок

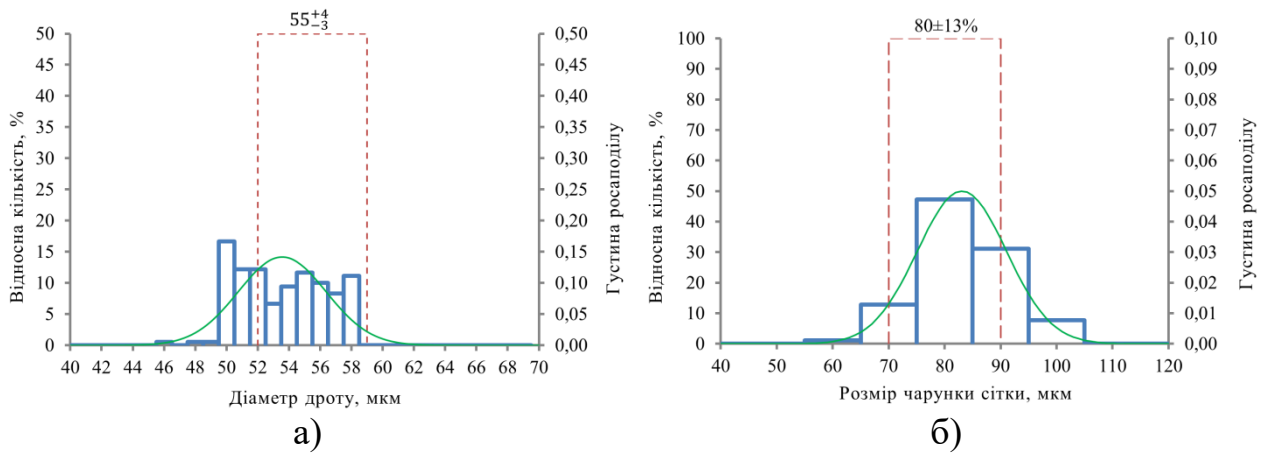


Рис. 10. Результати вимірів геометричних розмірів СРФ 2 з КЗ №9 (термін перебування в рідкій фазі НДМГ – 15 років): а) – товщини дроту; б) – розміри чарунок

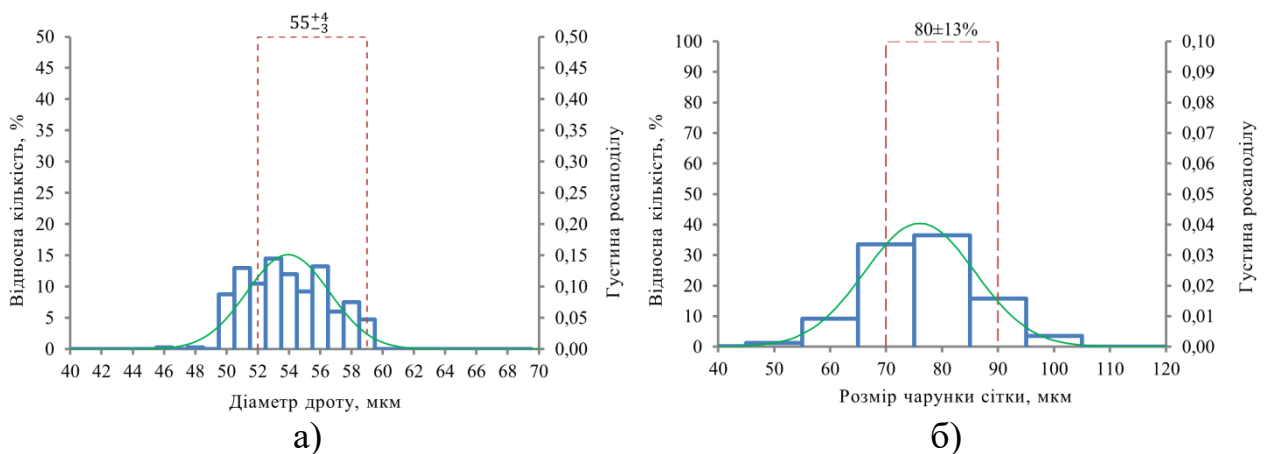


Рис. 11. Результати вимірів геометричних розмірів СРФ 3 з КЗ №9 (термін перебування під парами НДМГ – 15 років): а) – товщини дроту; б) – розміри чарунок

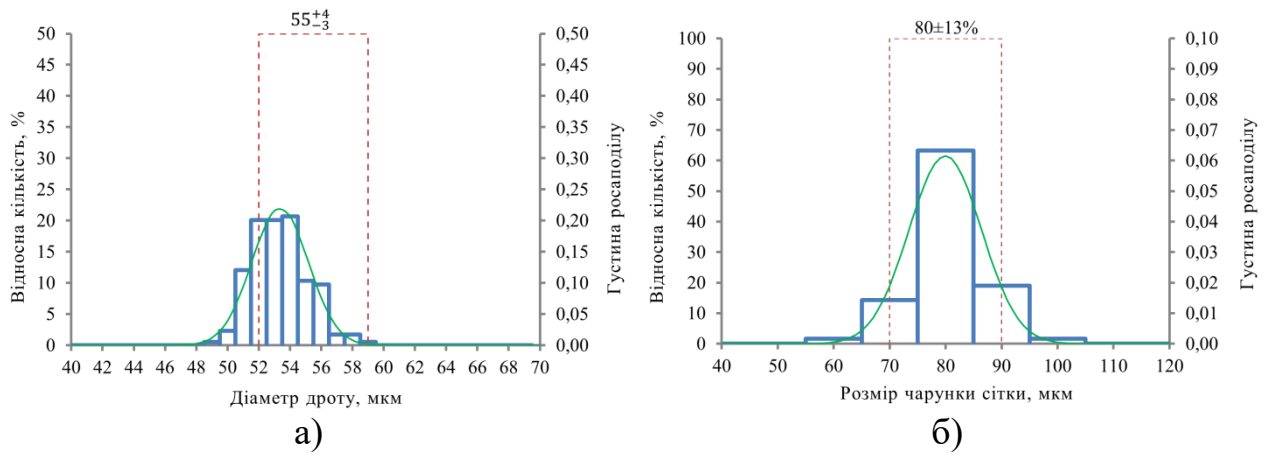


Рис. 12. Результати вимірів геометричних розмірів СРФ 1 з КЗ №10 (термін перебування в рідкій фазі АТ – 15 років та 2 місяця): а) – товщини дроту; б) – розміри чарунок

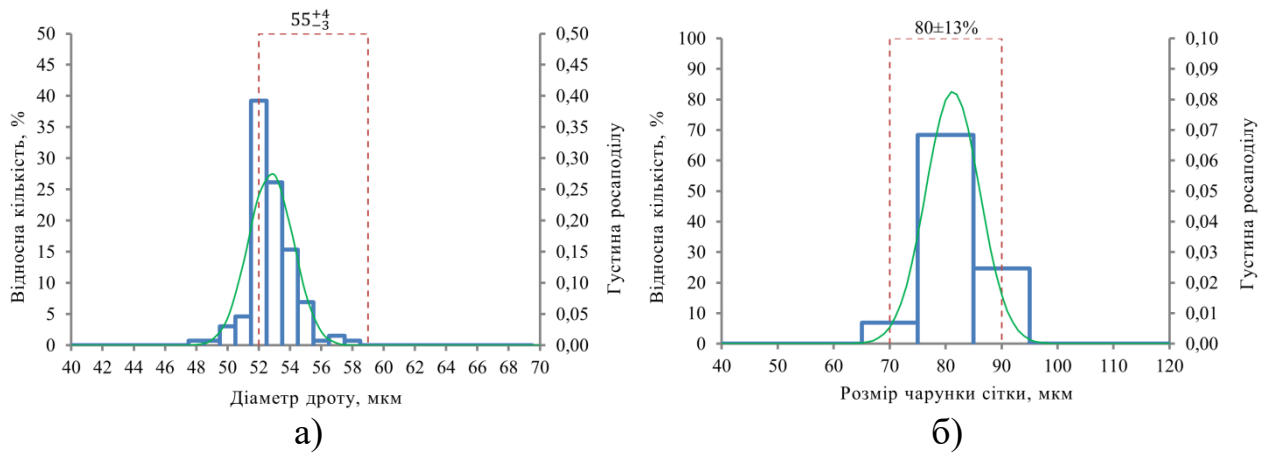


Рис. 13. Результати вимірів геометричних розмірів СРФ 2 з КЗ №10 (термін перебування в рідкій фазі АТ – 15 років та 2 місяця): а) – товщини дроту; б) – розміри чарунок

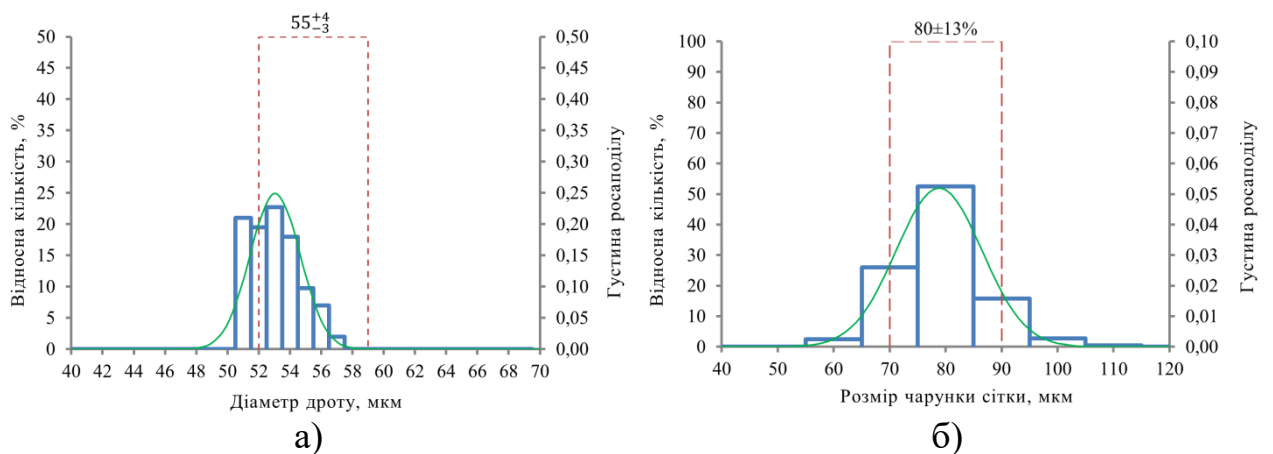


Рис. 14. Результати вимірів геометричних розмірів СРФ 3 з КЗ №10 (термін перебування під парами АТ – 15 років та 2 місяця): а) – товщини дроту; б) – розміри чарунок

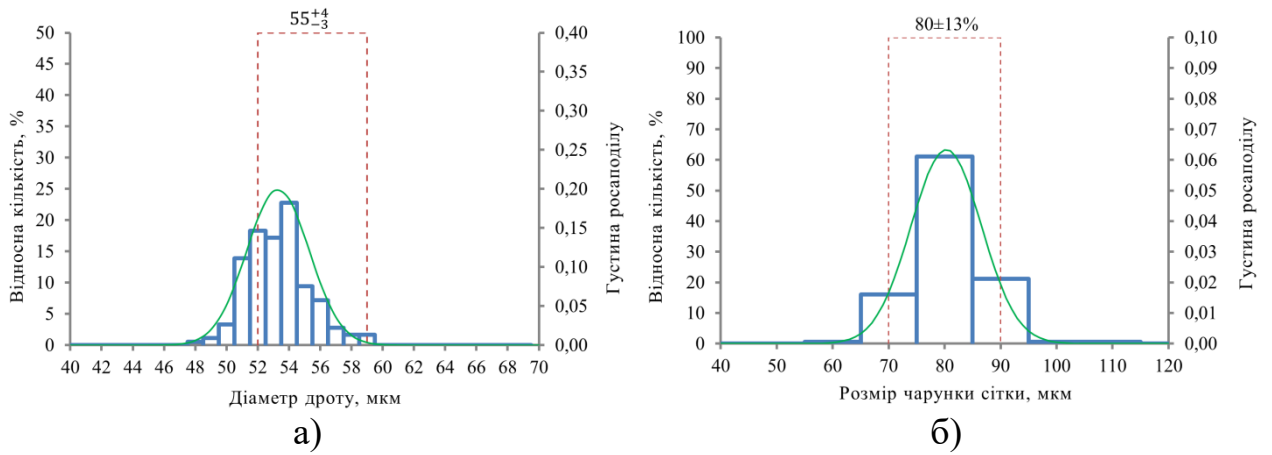


Рис. 15. Результати вимірів геометричних розмірів СРФ 1 з КЗ №10 (термін перебування в рідкій фазі НДМГ – 15 років та 2 місяця): а) – товщини дроту; б) – розміри чарунок

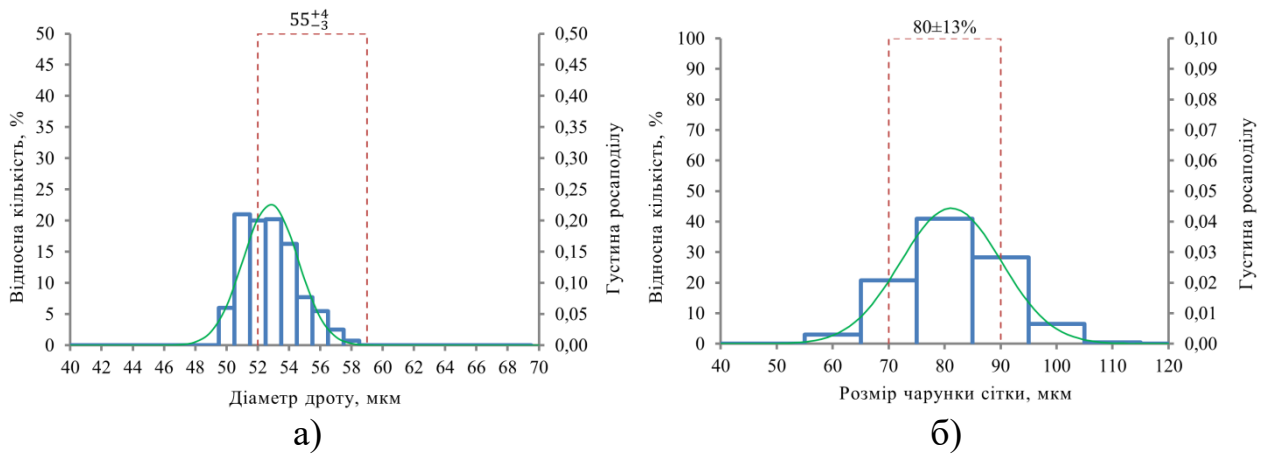


Рис. 16. Результати вимірів геометричних розмірів СРФ 3 з КЗ №10 (термін перебування під парами НДМГ – 15 років та 2 місяця): а) – товщини дроту; б) – розміри чарунок

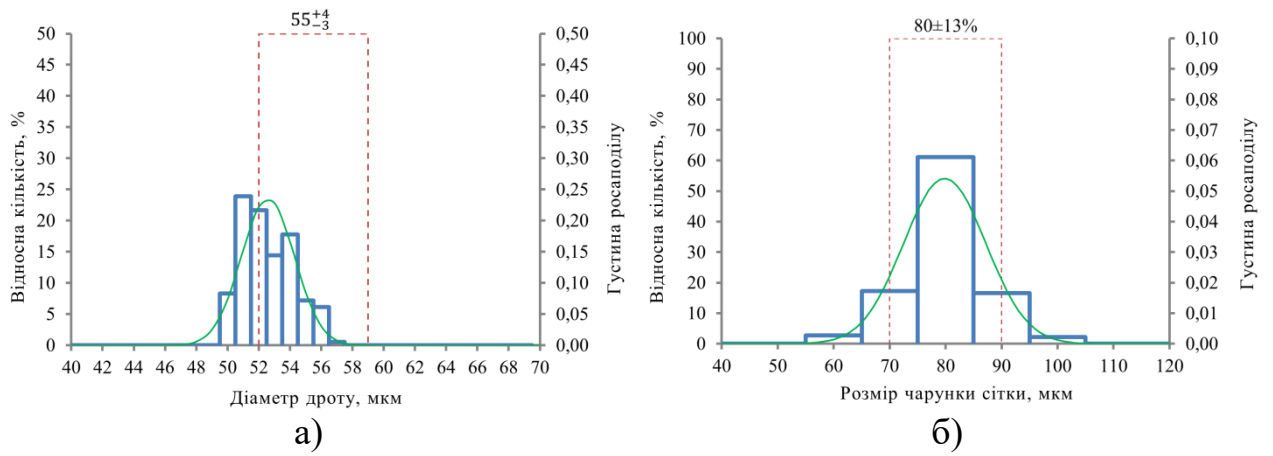


Рис. 17. Результати вимірів геометричних розмірів СРФ 1 з КЗ №11 (термін перебування в рідкій фазі АТ – 15 років та 2 місяця): а) – товщини дроту; б) – розміри чарунок

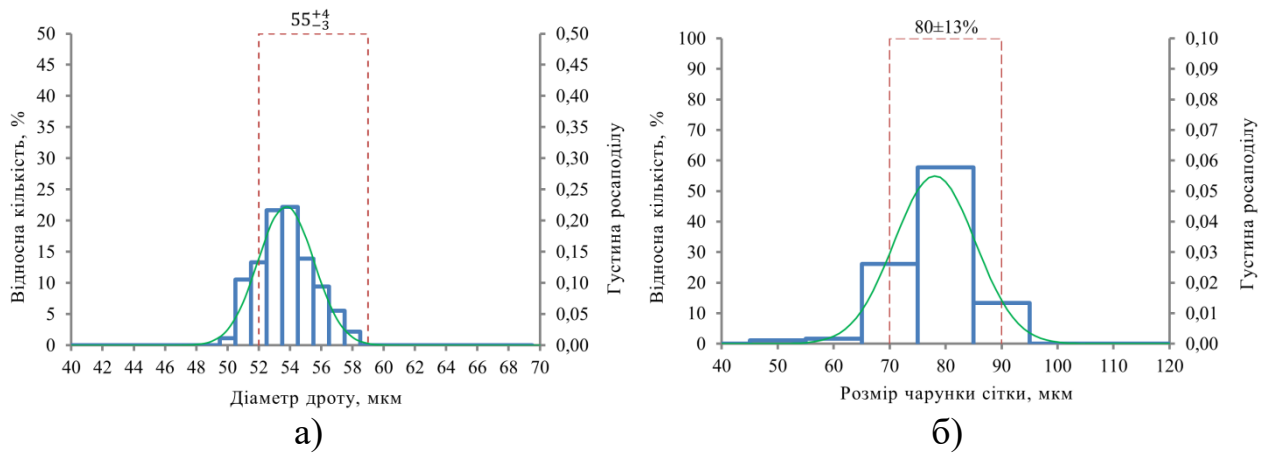


Рис. 18. Результати вимірів геометричних розмірів СРФ 2 з КЗ №11 (термін перебування в рідкій фазі АТ – 15 років та 2 місяця): а) – товщини дроту; б) – розміри чарунок

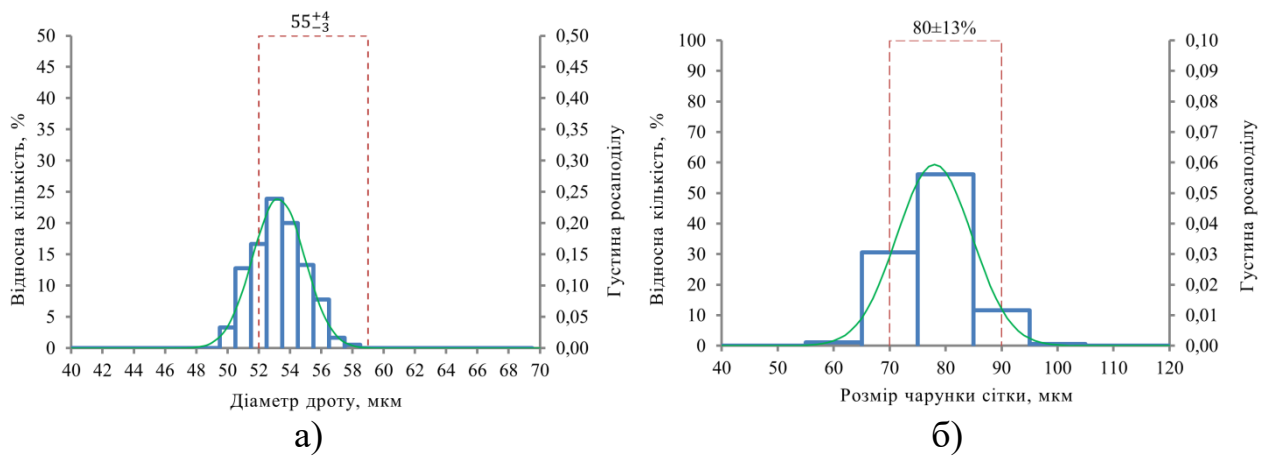


Рис. 19. Результати вимірів геометричних розмірів СРФ 3 з КЗ №11 (термін перебування під парами АТ – 15 років та 2 місяця): а) – товщини дроту; б) – розміри чарунок

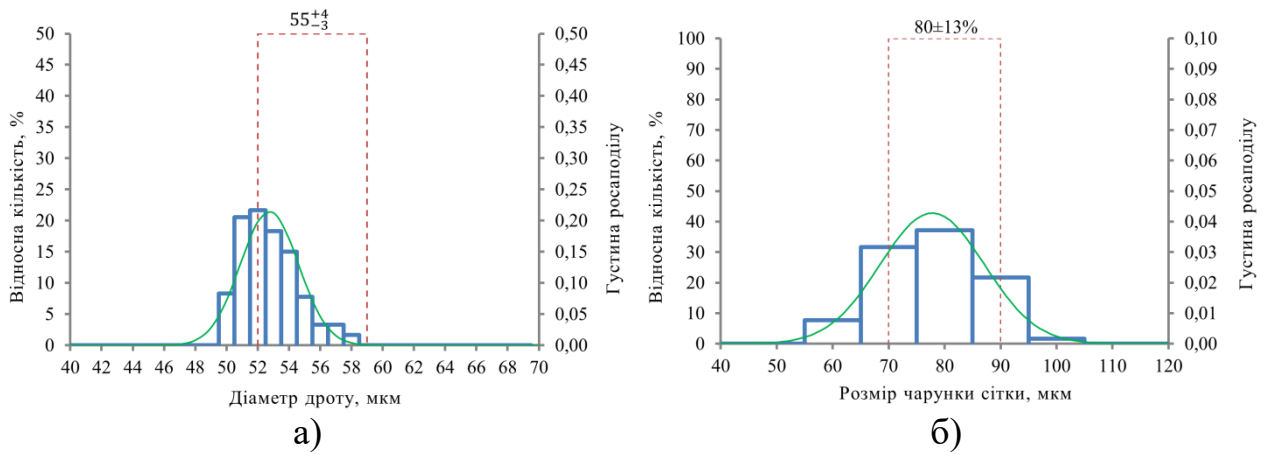


Рис. 20. Результати вимірів геометричних розмірів СРФ 1 з КЗ №11 (термін перебування в рідкій фазі НДМГ – 15 років та 2 місяця): а) – товщини дроту; б) – розміри чарунок

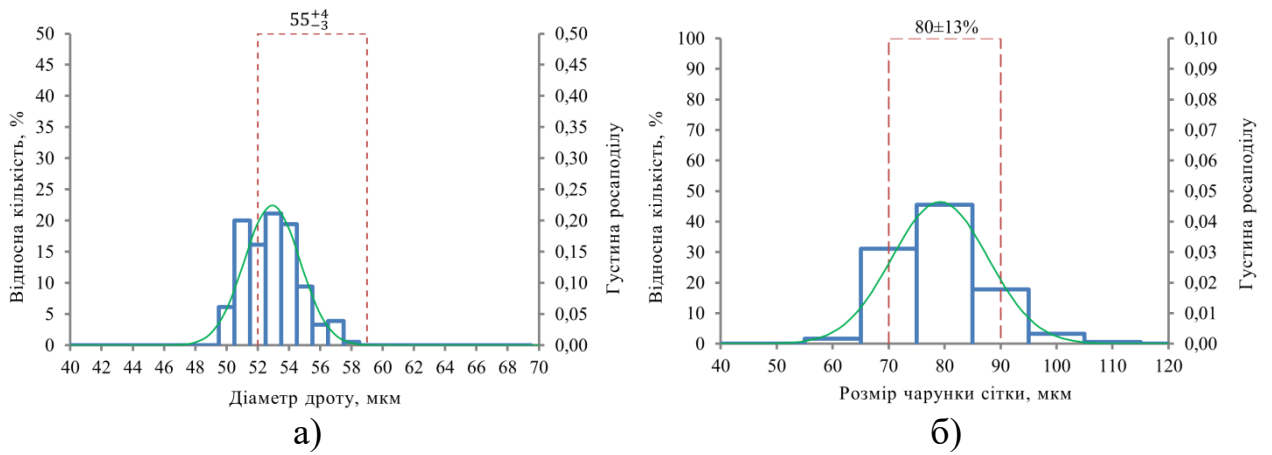


Рис. 21. Результати вимірів геометричних розмірів СРФ 2 з КЗ №11 (термін перебування в рідкій фазі НДМГ – 15 років та 2 місяця): а) – товщини дроту; б) – розміри чарунок

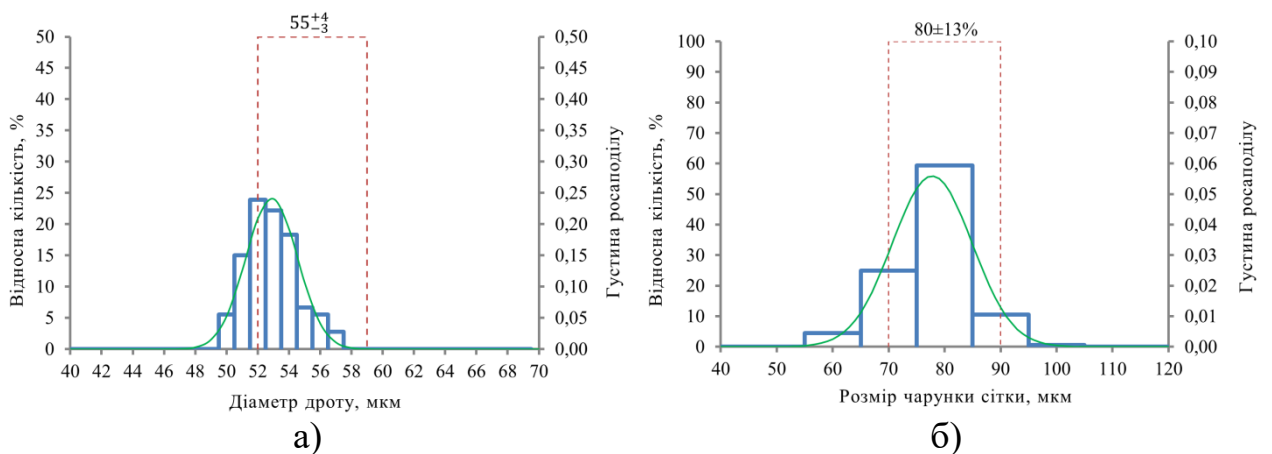


Рис. 22. Результати вимірів геометричних розмірів СРФ 3 з КЗ №11 (термін перебування під парами НДМГ – 15 років та 2 місяця): а) – товщини дроту; б) – розміри чарунок

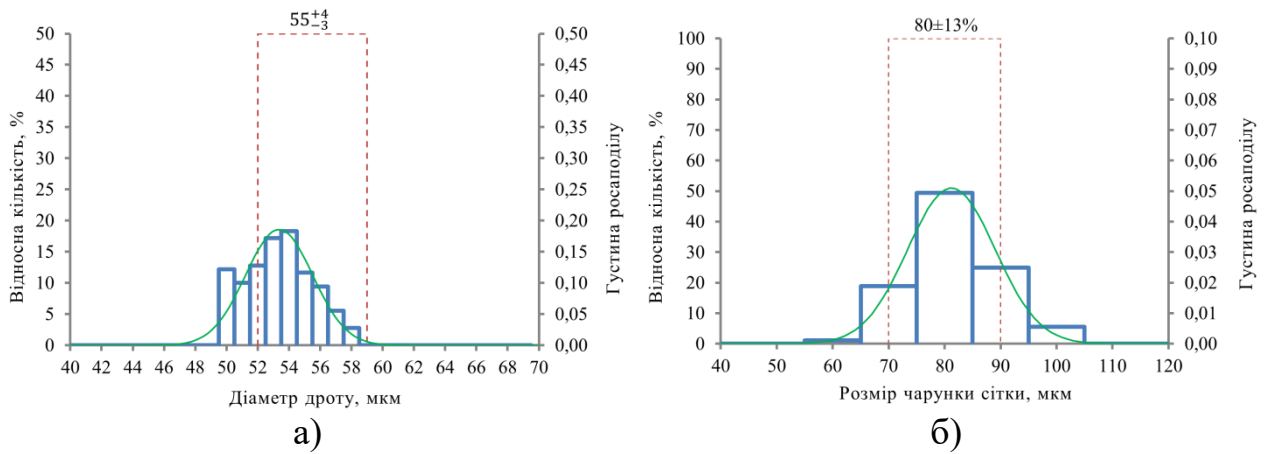


Рис. 23. Результати вимірів геометричних розмірів СРФ 1 з КЗ №12 (термін перебування в рідкій фазі АТ – 17 років та 5 місяців): а) – товщини дроту; б) – розміри чарунок

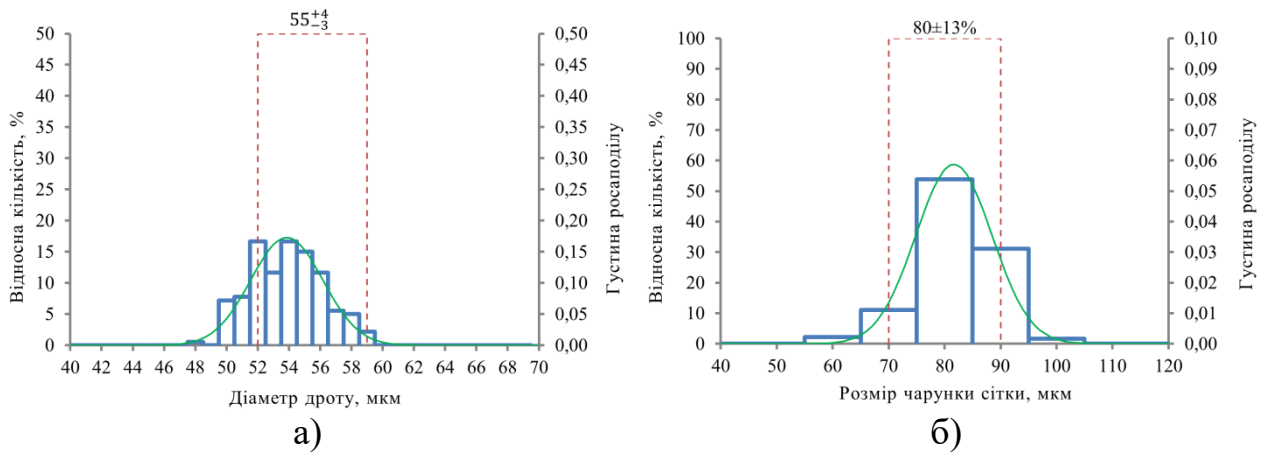


Рис. 24. Результати вимірів геометричних розмірів СРФ 2 з КЗ №12 (термін перебування в рідкій фазі АТ – 17 років та 5 місяців): а) – товщини дроту; б) – розміри чарунок

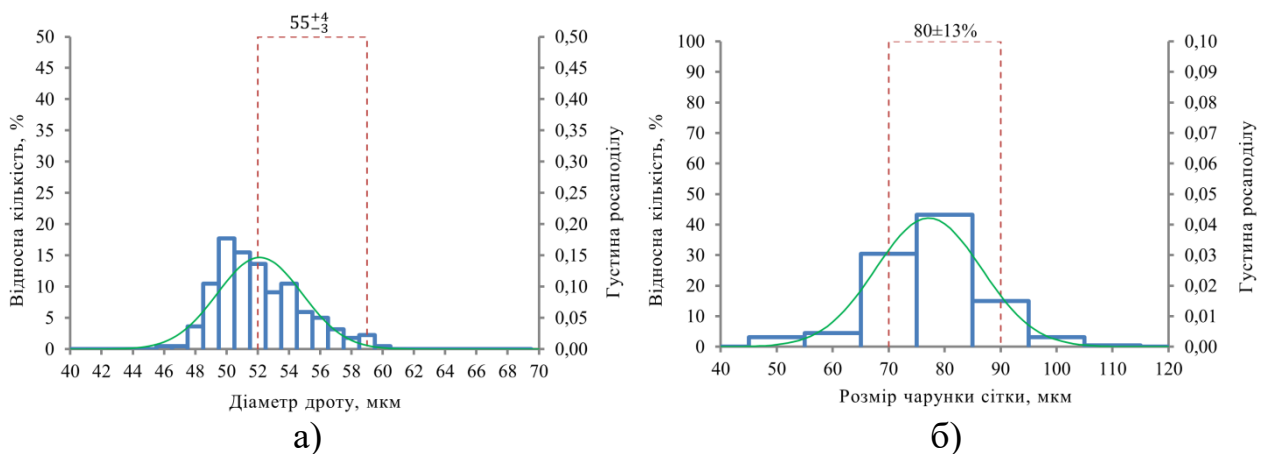


Рис. 25. Результати вимірів геометричних розмірів СРФ 3 з КЗ №12 (термін перебування під парами АТ – 17 років та 5 місяців): а) – товщини дроту; б) – розміри чарунок

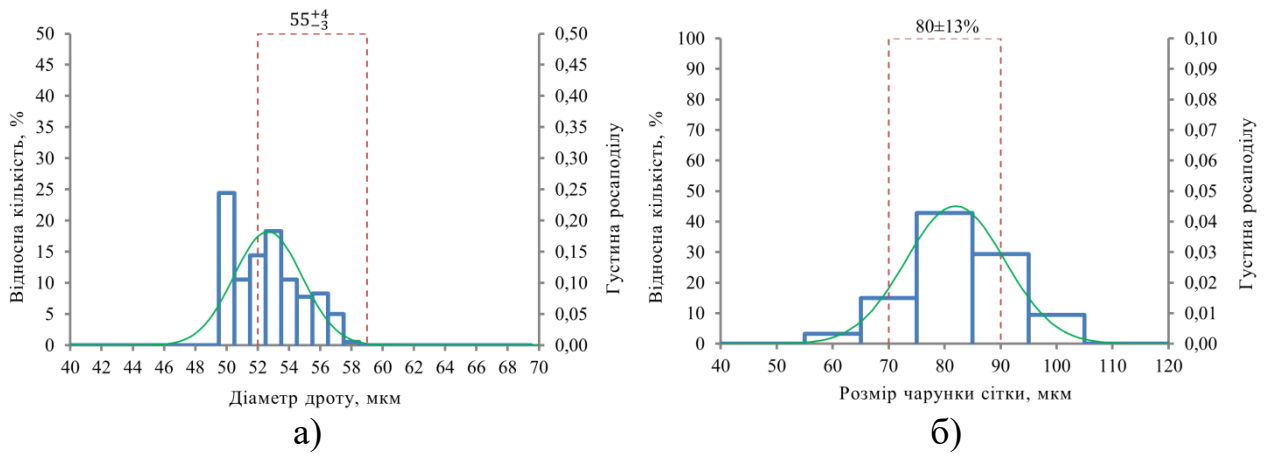


Рис. 26. Результати вимірів геометричних розмірів СРФ 1 з КЗ №12 (термін перебування в рідкій фазі НДМГ – 17 років та 5 місяців): а) – товщини дроту; б) – розміри чарунок

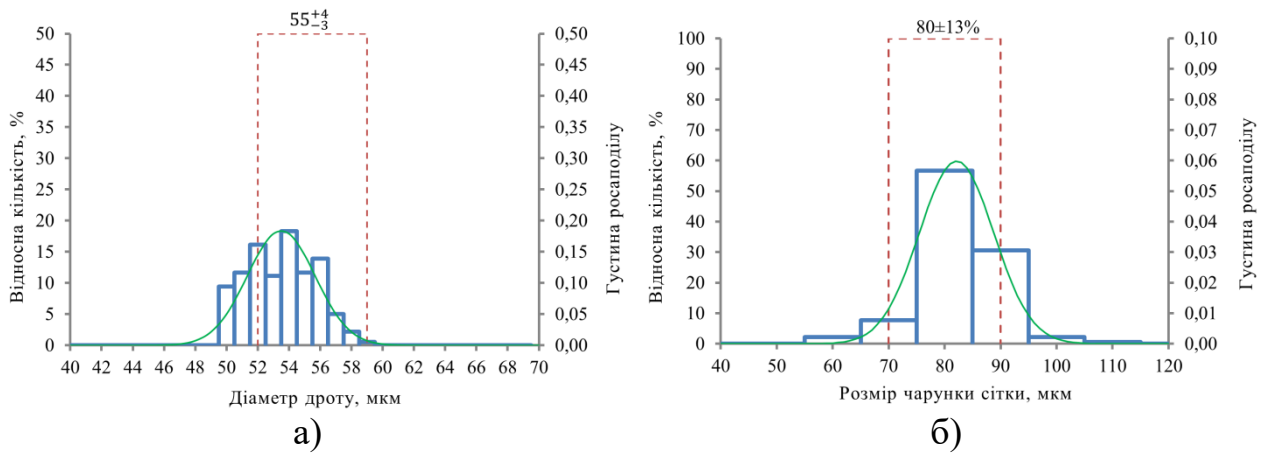


Рис. 27. Результати вимірів геометричних розмірів СРФ 2 з КЗ №12 (термін перебування в рідкій фазі НДМГ – 17 років та 5 місяців): а) – товщини дроту; б) – розміри чарунок

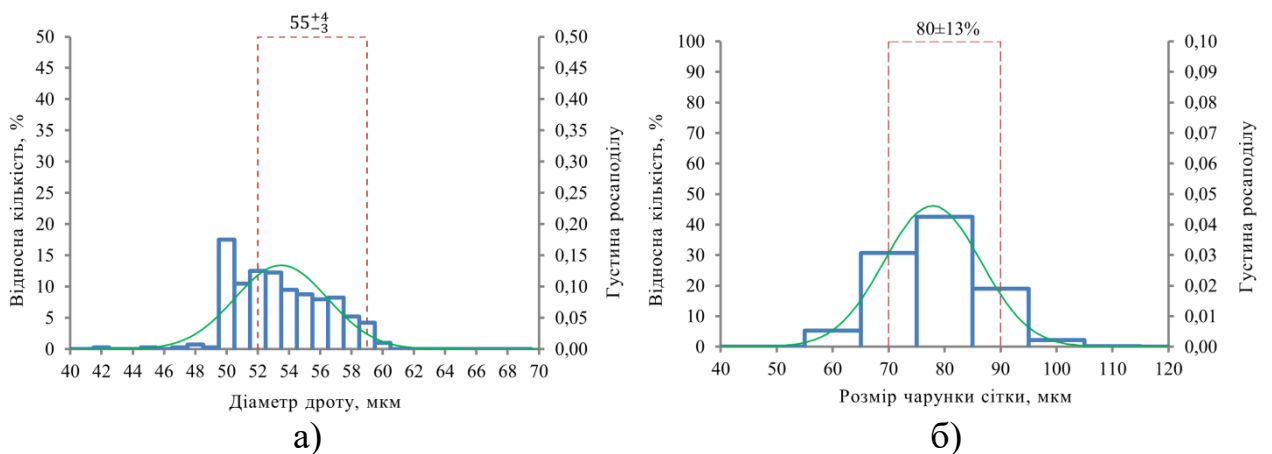


Рис. 28. Результати вимірів геометричних розмірів СРФ 3 з КЗ №12 (термін перебування під парами НДМГ – 17 років та 5 місяців): а) – товщини дроту; б) – розміри чарунок

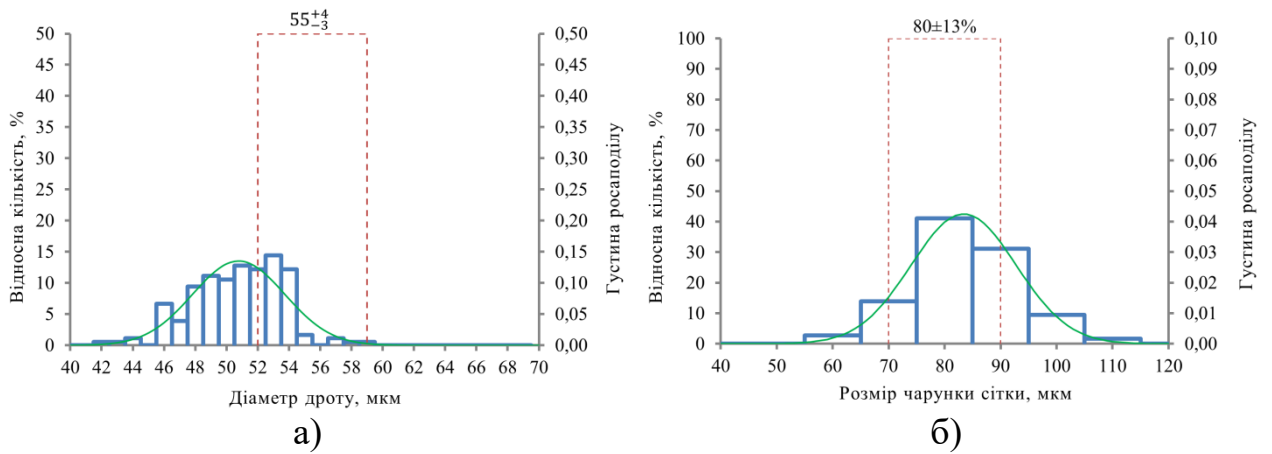


Рис. 29. Результати вимірів геометричних розмірів СРФ 1 з КЗ №13 (термін перебування в рідкій фазі АТ – 20 років): а) – товщини дроту; б) – розміри чарунок

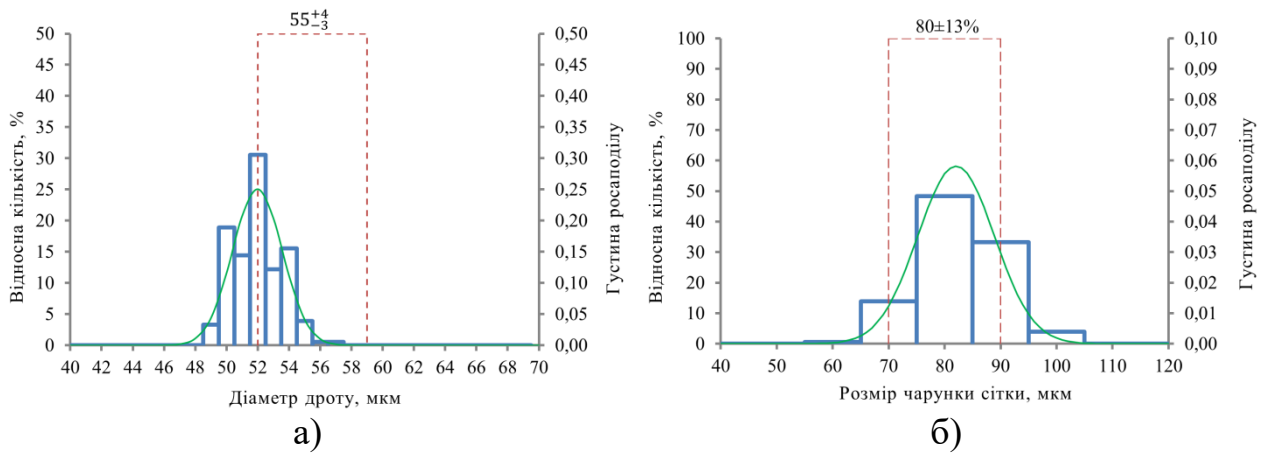


Рис. 30. Результати вимірів геометричних розмірів СРФ 2 з КЗ №13 (термін перебування в рідкій фазі АТ – 20 років): а) – товщини дроту; б) – розміри чарунок

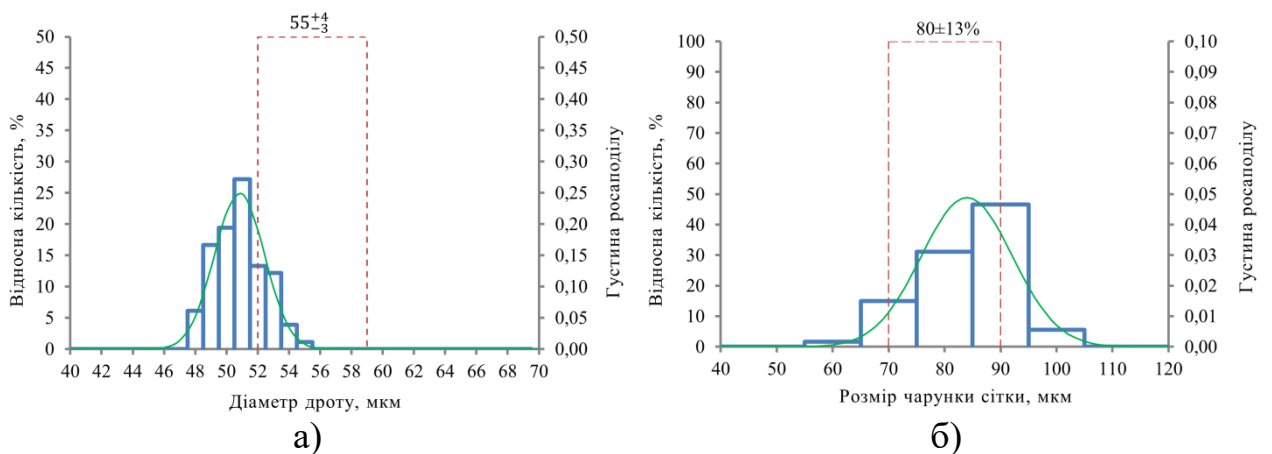


Рис. 31. Результати вимірів геометричних розмірів СРФ 3 з КЗ №13 (термін перебування під парами АТ – 20 років): а) – товщини дроту; б) – розміри чарунок

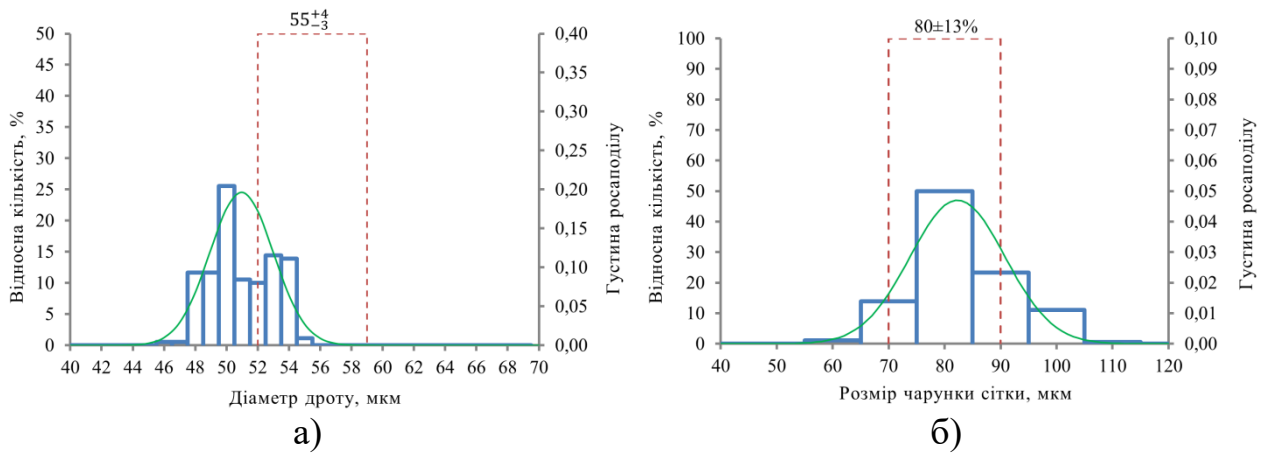


Рис. 32. Результати вимірів геометричних розмірів СРФ 1 з КЗ №13 (термін перебування в рідкій фазі НДМГ – 20 років): а) – товщини дроту; б) – розміри чарунок

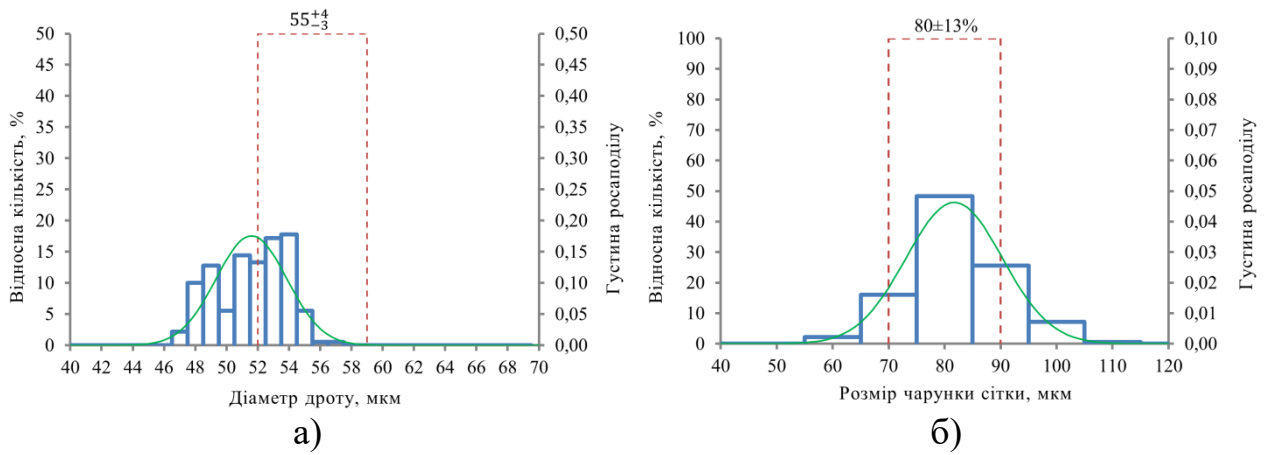


Рис. 33. Результати вимірів геометричних розмірів СРФ 2 з КЗ №13 (термін перебування в рідкій фазі НДМГ – 20 років): а) – товщини дроту; б) – розміри чарунок

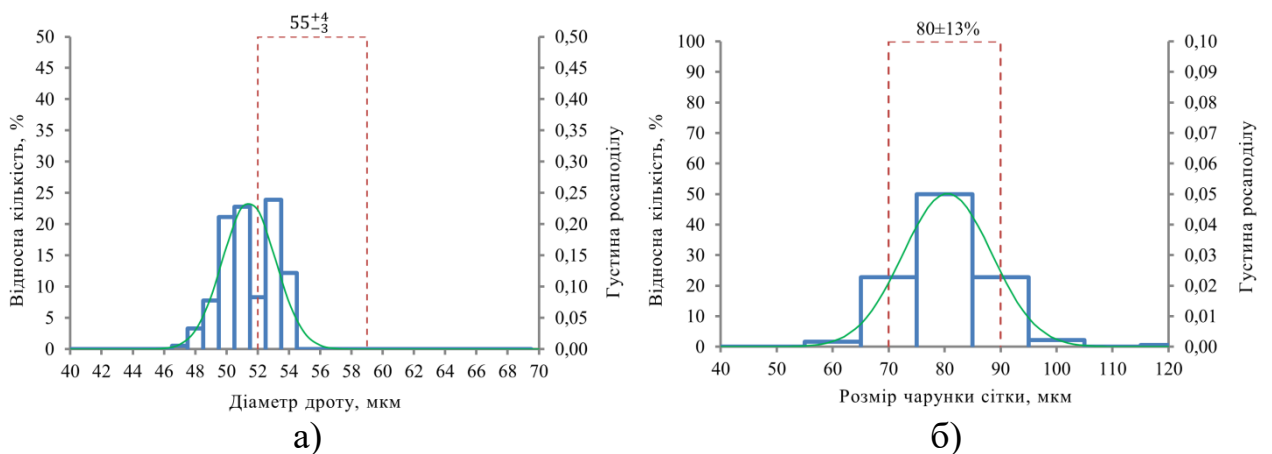


Рис. 34. Результати вимірів геометричних розмірів СРФ 3 з КЗ №13 (термін перебування під парами НДМГ – 20 років): а) – товщини дроту; б) – розміри чарунок

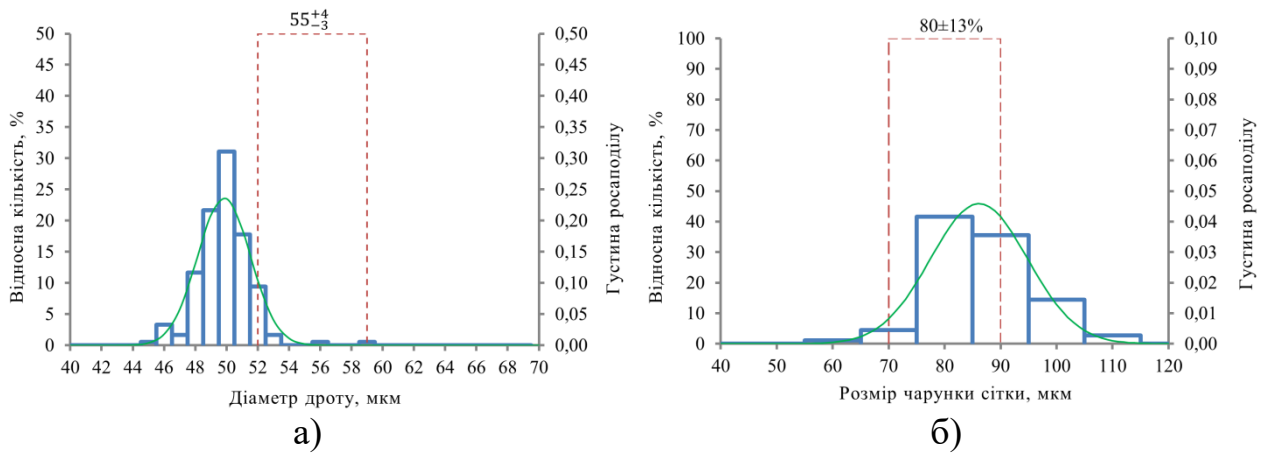


Рис. 35. Результати вимірів геометричних розмірів СРФ 1 з КЗ №14 (термін перебування в рідкій фазі АТ – 20 років та 10 місяців): а) – товщини дроту; б) – розміри чарунок

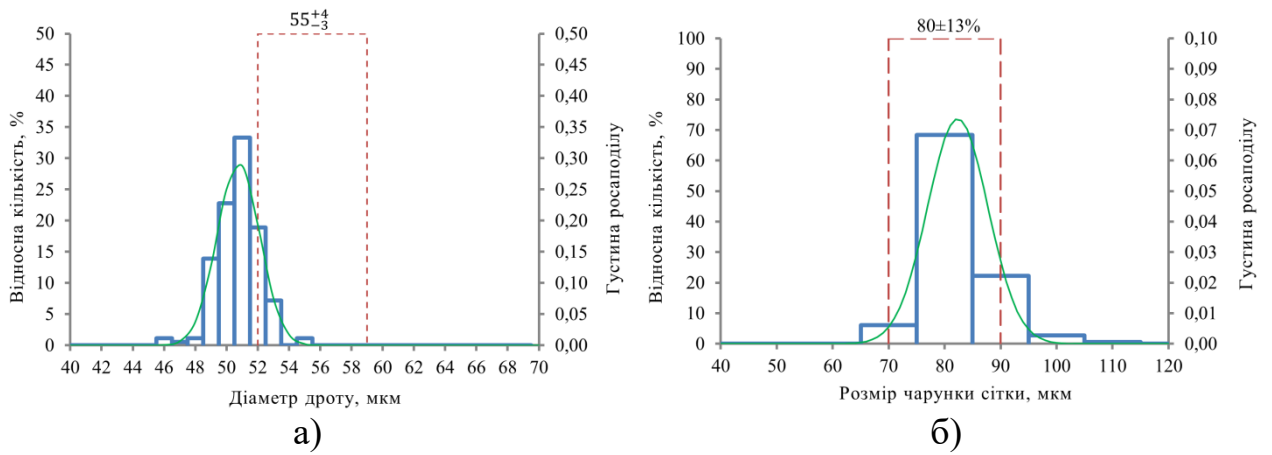


Рис. 36. Результати вимірів геометричних розмірів СРФ 2 з КЗ №14 (термін перебування в рідкій фазі АТ – 20 років та 10 місяців): а) – товщини дроту; б) – розміри чарунок

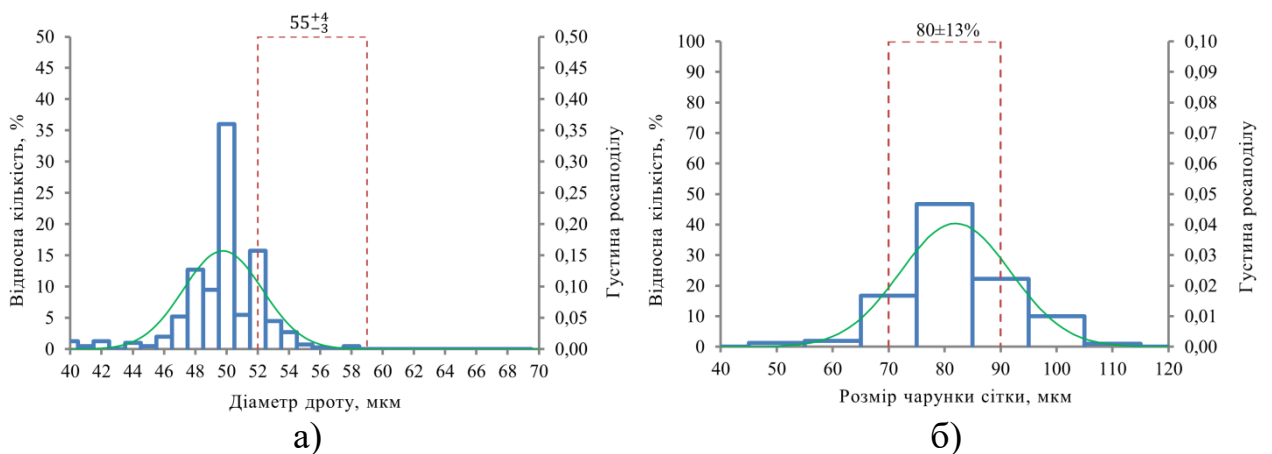


Рис. 37. Результати вимірів геометричних розмірів СРФ 3 з КЗ №14 (термін перебування під парами АТ – 20 років та 10 місяців): а) – товщини дроту; б) – розміри чарунок

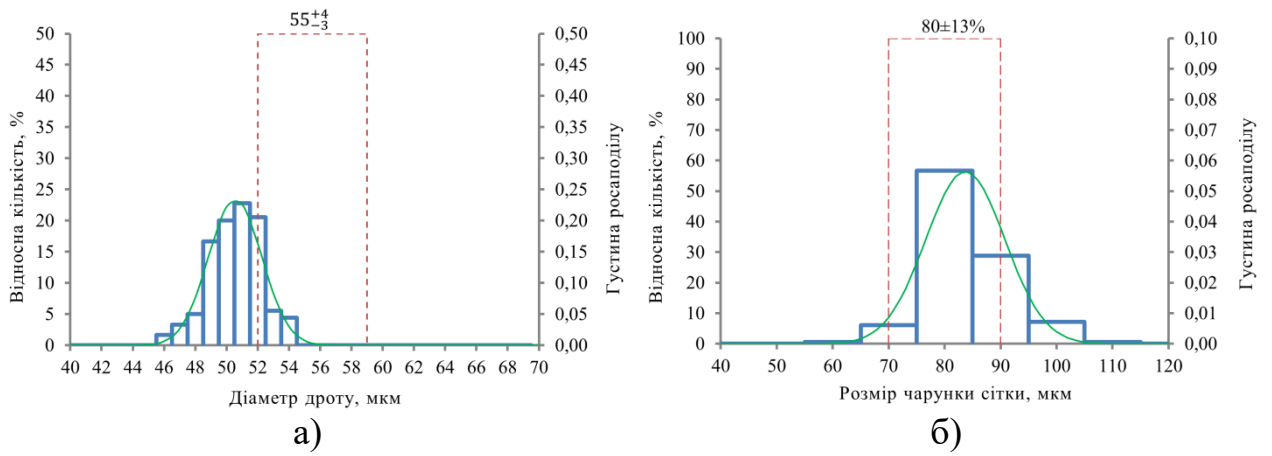


Рис. 38. Результати вимірів геометричних розмірів СРФ 1 з КЗ №14 (термін перебування в рідкій фазі НДМГ – 20 років та 10 місяців): а) – товщини дроту; б) – розміри чарунок

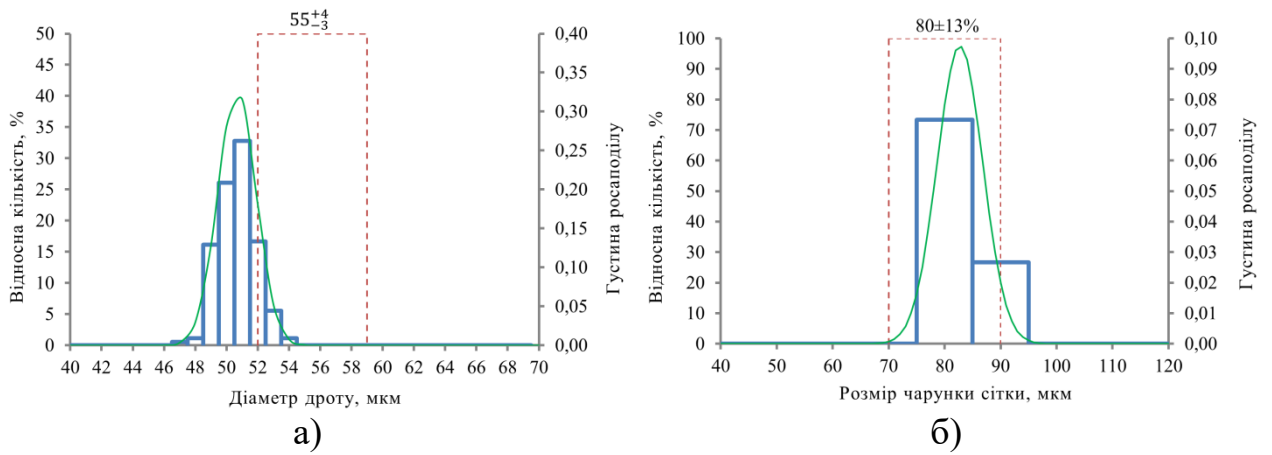


Рис. 39. Результати вимірів геометричних розмірів СРФ 2 з КЗ №14 (термін перебування в рідкій фазі НДМГ – 20 років та 10 місяців): а) – товщини дроту; б) – розміри чарунок

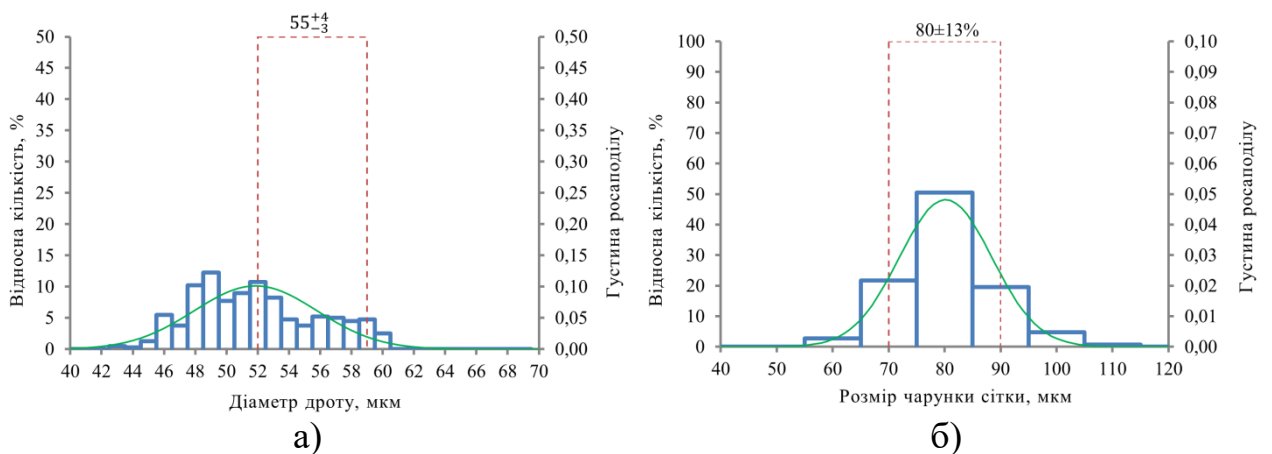


Рис. 40. Результати вимірів геометричних розмірів СРФ 3 з КЗ №14 (термін перебування під парами НДМГ – 20 років та 10 місяців): а) – товщини дроту; б) – розміри чарунок

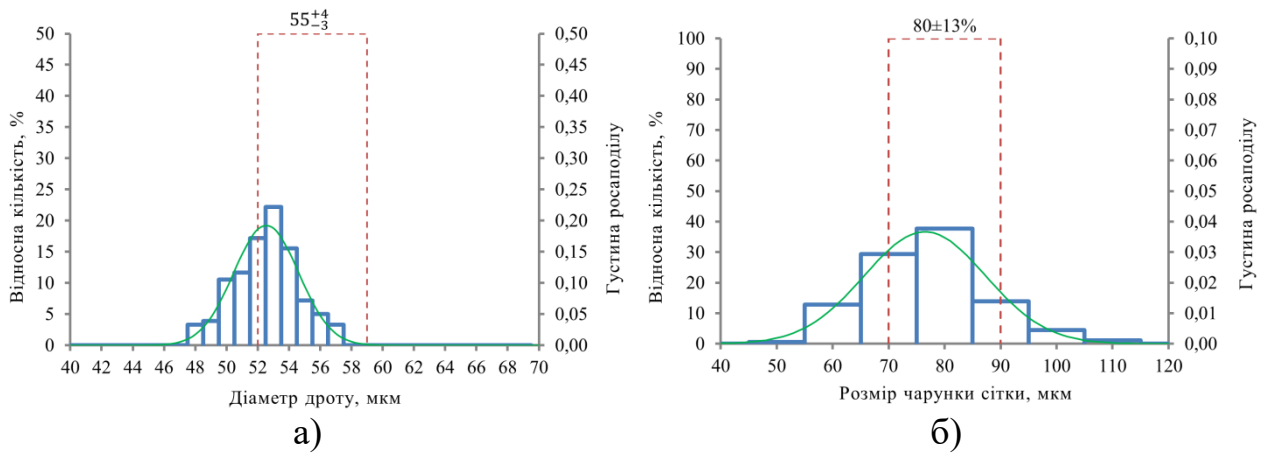


Рис. 41. Результати вимірів геометричних розмірів СРФ 1 з КЗ №15 (термін перебування в рідкій фазі АТ – 23 рока): а) – товщини дроту; б) – розміри чарунок

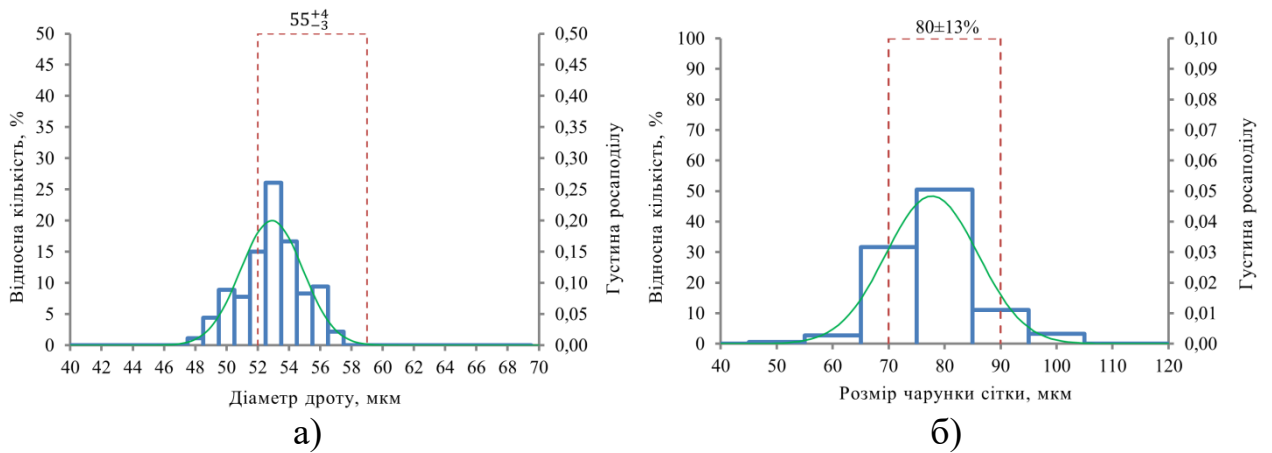


Рис. 42. Результати вимірів геометричних розмірів СРФ 2 з КЗ №15 (термін перебування в рідкій фазі АТ – 23 рока): а) – товщини дроту; б) – розміри чарунок

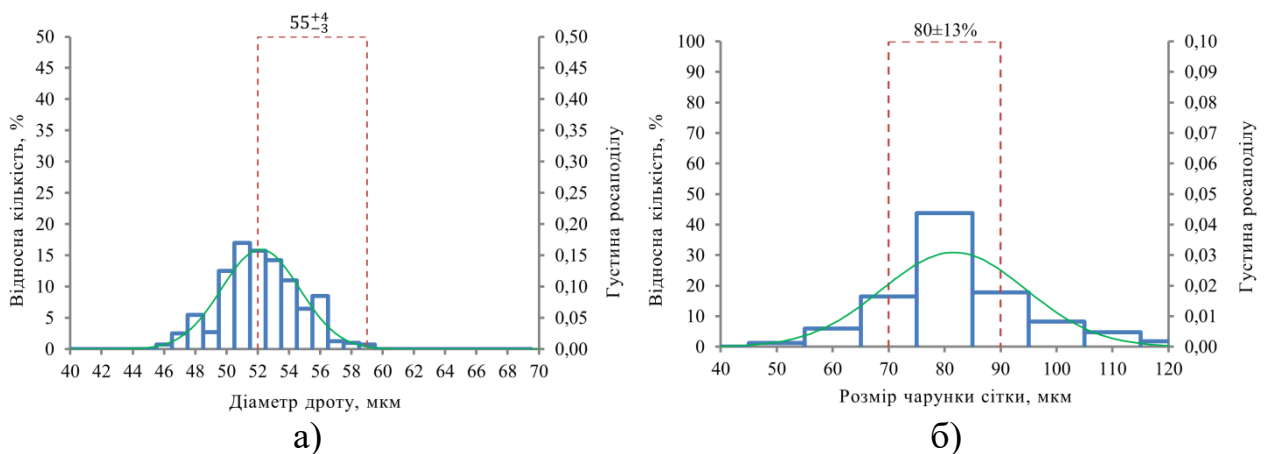


Рис. 43. Результати вимірів геометричних розмірів СРФ 3 з КЗ №15 (термін перебування під парами АТ – 23 рока): а) – товщини дроту; б) – розміри чарунок

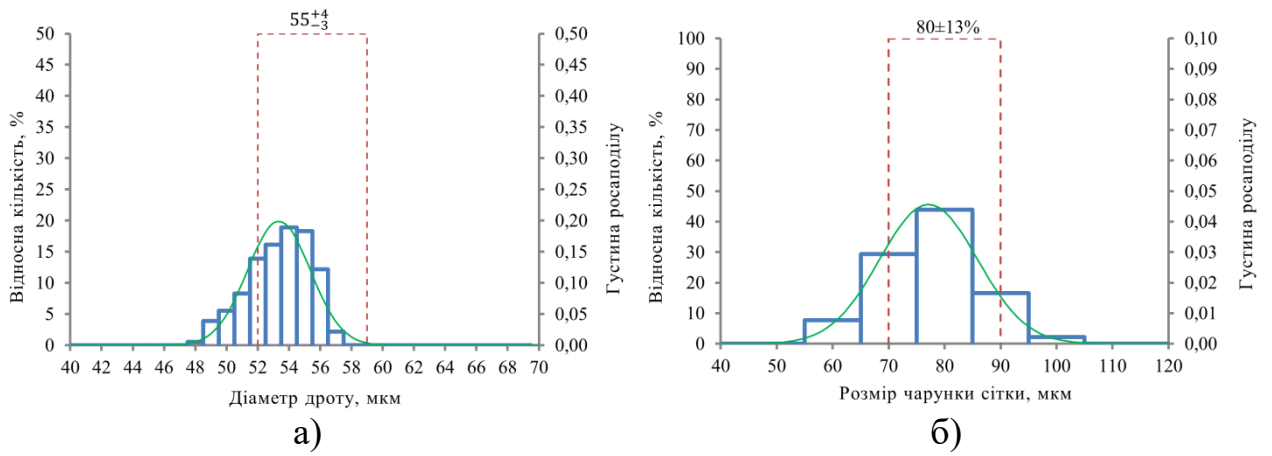


Рис. 44. Результати вимірів геометричних розмірів СРФ 1 з КЗ №15 (термін перебування в рідкій фазі НДМГ – 23 рока): а) – товщини дроту; б) – розміри чарунок

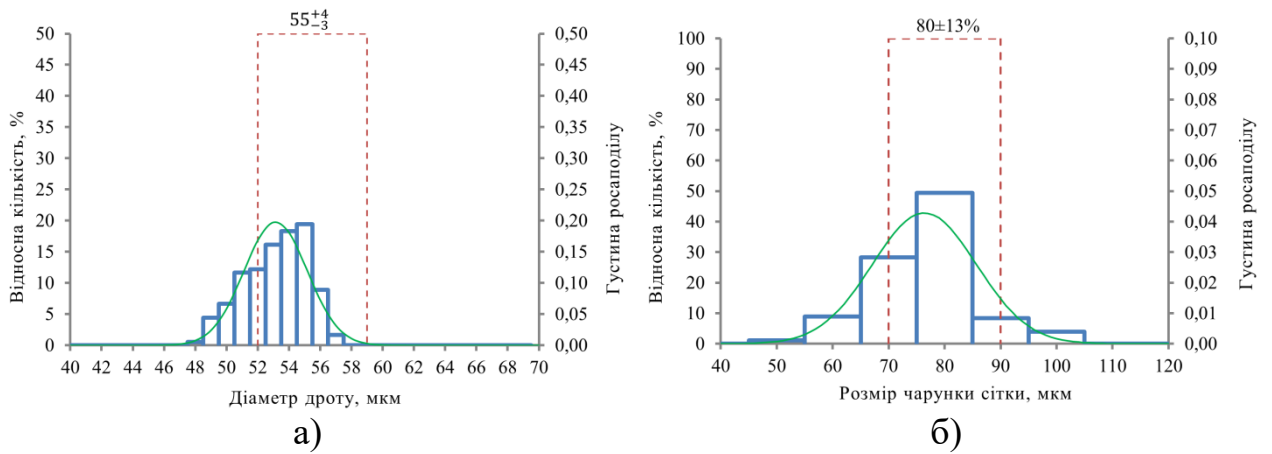


Рис. 45. Результати вимірів геометричних розмірів СРФ 2 з КЗ №15 (термін перебування в рідкій фазі НДМГ – 23 рока): а) – товщини дроту; б) – розміри чарунок

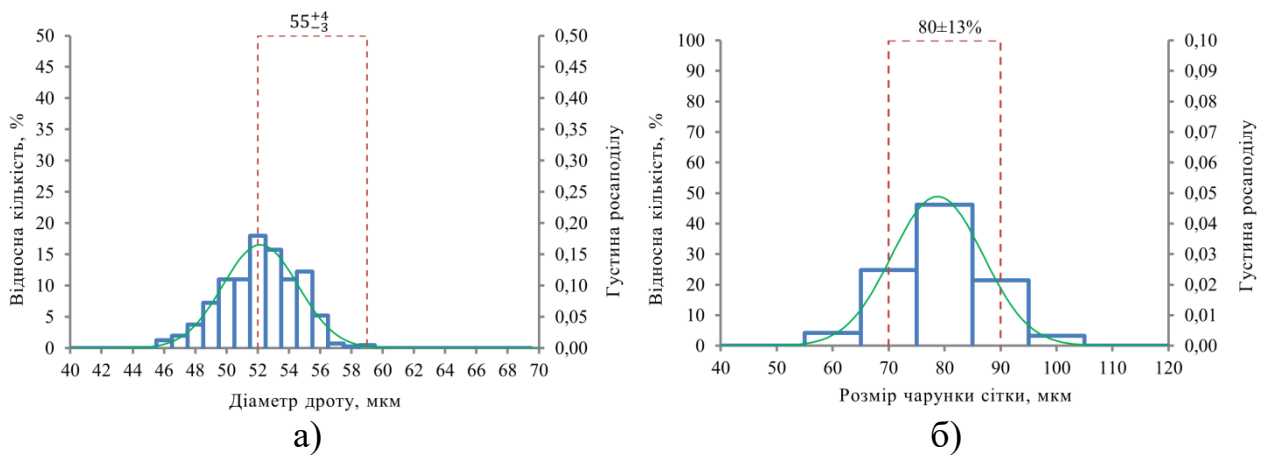


Рис. 46. Результати вимірів геометричних розмірів СРФ 3 з КЗ №15 (термін перебування під парами НДМГ – 23 рока): а) – товщини дроту; б) – розміри чарунок

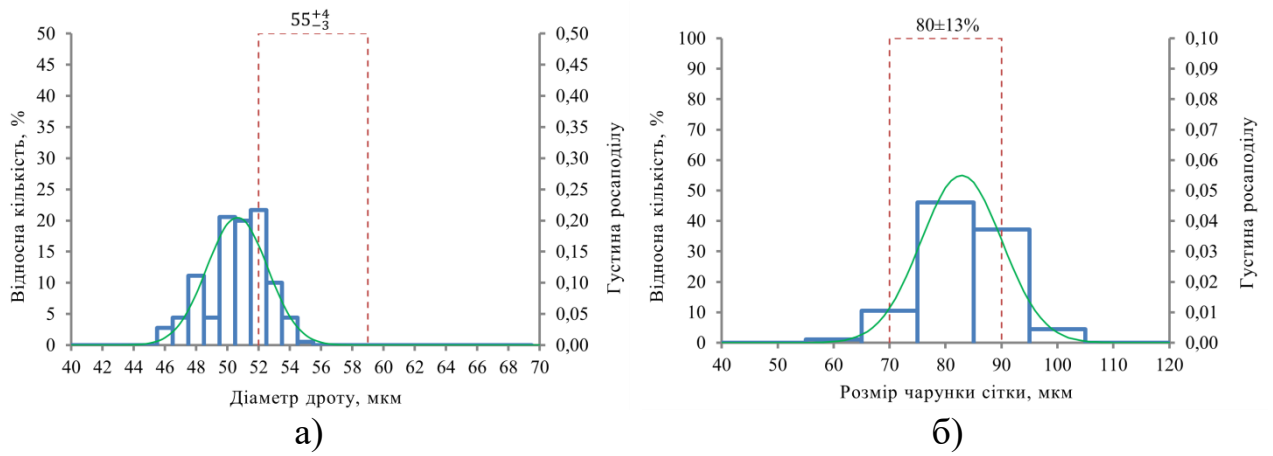


Рис. 47. Результати вимірів геометричних розмірів СРФ 1 з КЗ №16 (термін перебування в рідкій фазі АТ – 31 рік та 1 місяць): а) – товщини дроту; б) – розміри чарунок

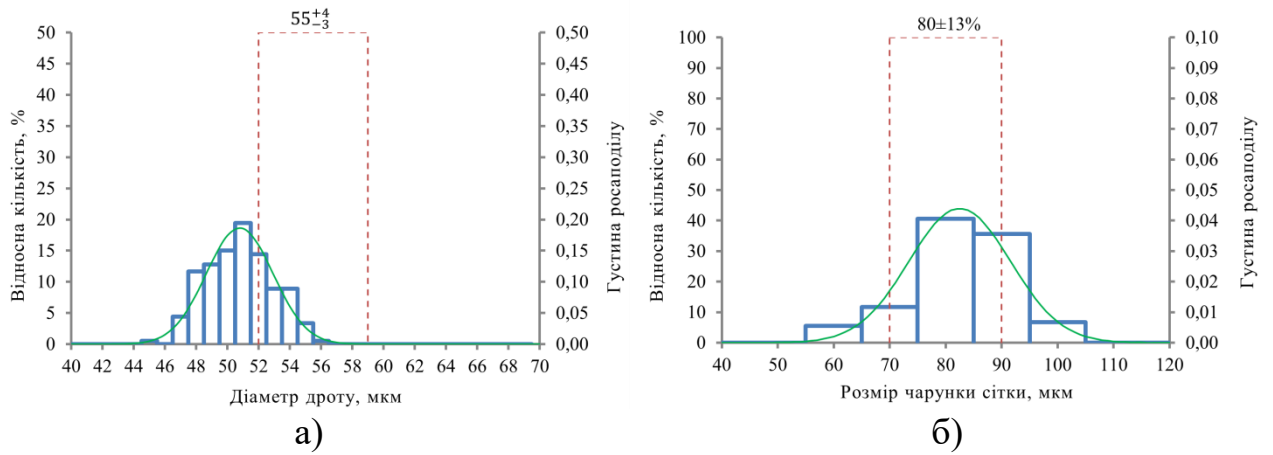


Рис. 48. Результати вимірів геометричних розмірів СРФ 2 з КЗ №16 (термін перебування в рідкій фазі АТ – 31 рік та 1 місяць): а) – товщини дроту; б) – розміри чарунок

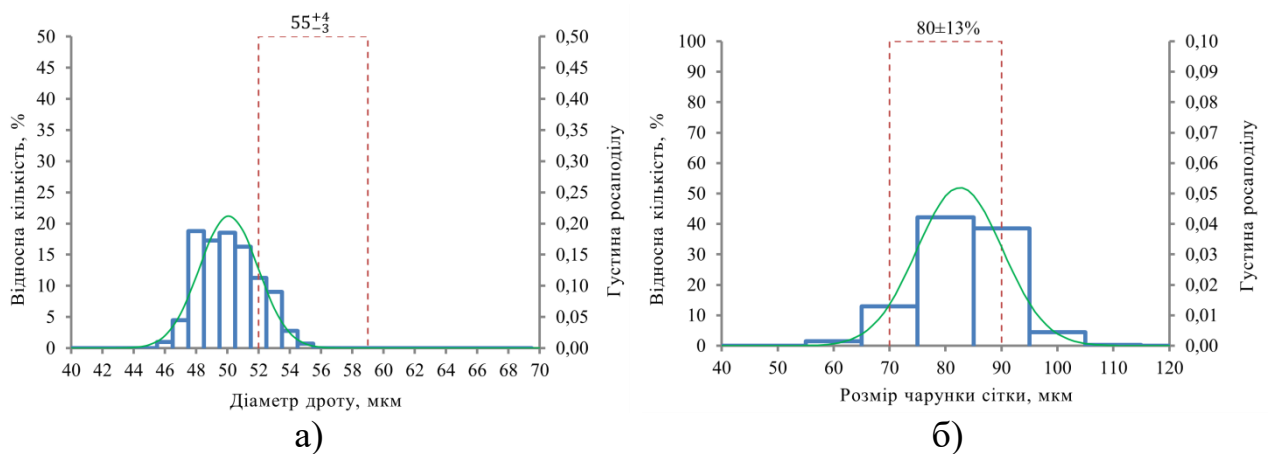


Рис. 49. Результати вимірів геометричних розмірів СРФ 3 з КЗ №16 (термін перебування під парами АТ – 31 рік та 1 місяць): а) – товщини дроту; б) – розміри чарунок

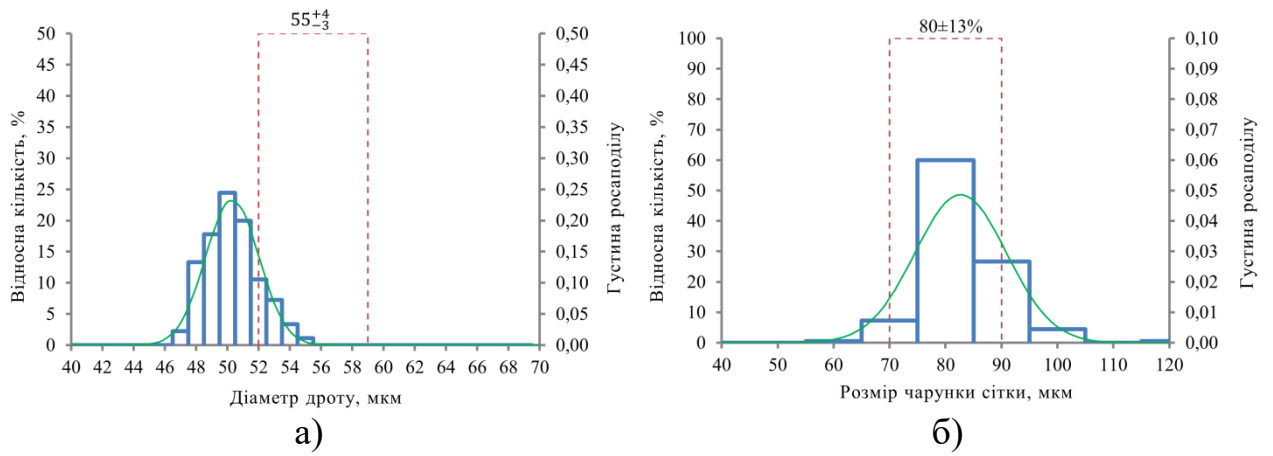


Рис. 50. Результати вимірів геометричних розмірів СРФ 1, з КЗ №16 (термін перебування в рідкій фазі НДМГ – 31 рік та 1 місяць): а) – товщини дроту; б) – розміри чарунок

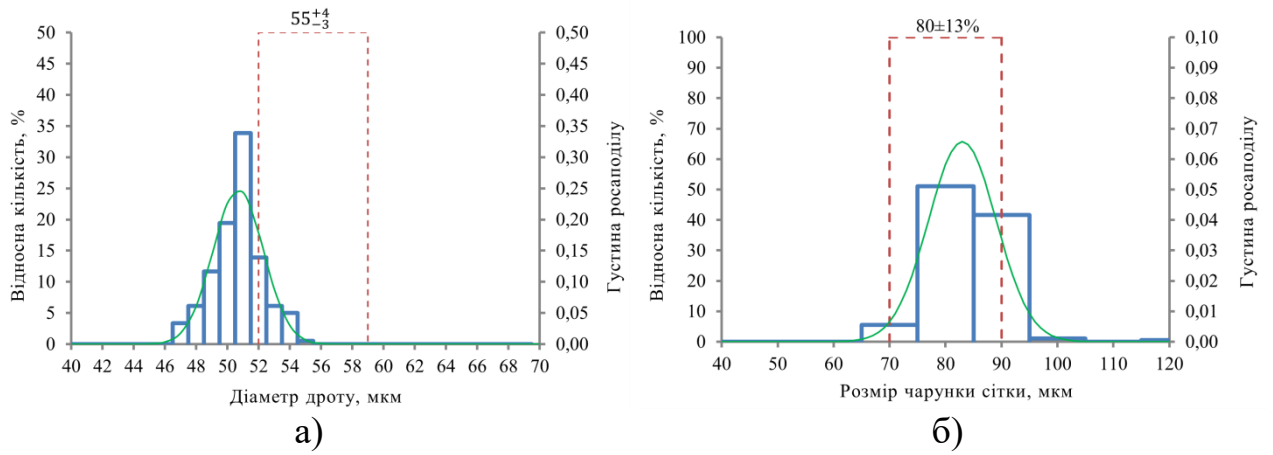


Рис. 51. Результати вимірів геометричних розмірів СРФ 2 з КЗ №16 (термін перебування в рідкій фазі НДМГ – 31 рік та 1 місяць): а) – товщини дроту; б) – розміри чарунок

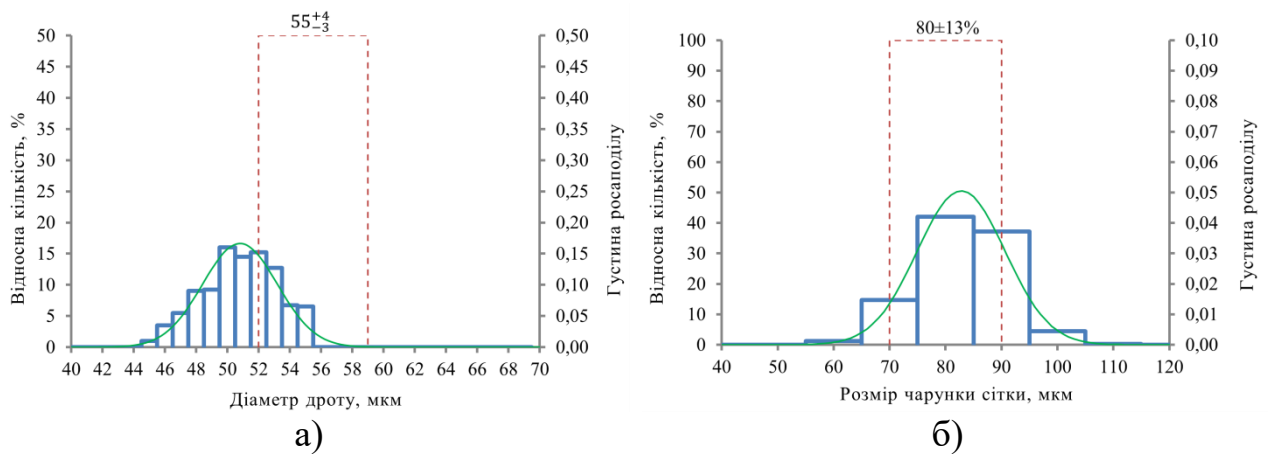


Рис. 52. Результати вимірів геометричних розмірів СРФ 3 з КЗ №16 (термін перебування під парами НДМГ – 31 рік та 1 місяць): а) – товщини дроту; б) – розміри чарунок

ДОДАТОК В
РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ВИЗНАЧЕННЯ КАПІЛЯРНОЇ
УТРИМУЮЧОЇ ЗДАТНОСТІ СІТЧАСТИХ РОЗДІЛЮВАЧІВ ФАЗ

Таблиця 1

Результати визначення КУЗ СРФ з комплекту зразків №8 (термін перебування в рідкій фазі і під парами АТ – 14 років)

№ іспиту	Температура, °С	Показники п'єзометрів, мм						Висота газового об'єму під сіткою, мм			КУЗ, мм ст. роб. рід.	
		Одиночний прорив			Масовий прорив			$P_{зниз.}$, кгс/см ²	Δh_p , мм	h_c , мм	одиночний прорив	масовий прорив
		під сіткою	над сіткою	різниця	під сіткою	над сіткою	різниця					
СРФ 1, сітка №008 (іспити в день монтажу)												
1	3-8	130	71	59	122	71	51	1	2,5	21	80	72
2		129	71	58	123	71	52	1	2,5	21	79	73
3		130	70	60	122	72	50	1	3	24	84	74
1	9-12	128	72	56	120	72	48	1,1	2,5	20,3	76,3	68,3
2		130	72	58	121	73	48	0,9	3	24	82	72
3		128	72	56	120	72	48	1	2	16,3	72,3	64,3
1	13-16	126	71	55	118	73	45	1	4,5	31,3	86,3	76,3
2		127	72	55	118	73	45	1	4	28	83	73
3		127	72	55	119	73	45	1	4	28	83	74
СРФ 1, сітка №008 (іспити після 7 тижнів витримки у КП)												
1	13	122	72	50	118	72	46	1	4	28	78	74
2		123	72	51	119	72	47	1	4	28	79	75
3		121	73	48	118	73	45	1	3	24	72	69
СРФ 2, сітка №008 (іспити в день монтажу)												
1	3,5	128	72	56	123	72	51	1,1	3	23	79	74
2		129	72	57	122	72	50	1,1	3	23	80	73
3		131	72	59	123	72	51	1,1	3	23	82	74
1	8-11	128	73	55	123	72	51	1,1	3	23	78	74
2		128	72	56	124	72	52	1,1	3	23	79	75
3		129	72	57	124	72	52	1,1	2,5	21,3	78,3	73,3
1	13-14	125	75	50	121	75	46	1,2	3,5	25,6	75,6	71,6
2		126	73	53	122	73	49	1,1	4	27	80	76
3		126	73	53	121	73	48	1,1	3,5	26,5	79,5	74,5
СРФ 2, сітка №008 (іспити після 7 тижнів витримки у КП)												
1	15-16,8	120	70	50	118	70	48	1	2,5	21	71	69
2		119	69	50	118	69	49	1	2,5	21	71	70
3		119	69	50	117	69	48	1	2,5	21	71	69

СРФ 3, сітка №008 (іспити в день монтажу)												
1	4-7	118	73	45	119	73	46	1	3	11	56	57
2		118	72	46	120	72	48	1	2,5	9	55	57
3		119	72	47	120	72	48	1	2,5	9	56	57
1	9-11	118	73	45	119	73	46	1,05	2,5	9	54	55
2		118	74	44	120	74	46	0,95	2	8	52	54
3		118	73	45	120	73	47	1	2	7,5	52,5	54,5
1	13-15	118	75	43	120	75	45	1,1	3,5	13	56	58
2		116	75	41	118	75	33	0,95	2	8	49	51
3		118	75	43	119	75	44	1,1	2	6,5	49,5	50,5
СРФ 3, сітка №008 (іспити після 7 тижнів витримки у КП)												
1	8,5	117	76	41	118	76	42	1	3,5	13,5	54,5	55,5
2		118	74	44	118	74	44	1	2,5	10	54	54
3		118	74	44	118	74	44	1	2,5	10	54	54

Таблиця 2

Результати визначення КУЗ СРФ з комплекту зразків №8 (термін перебування в рідкій фазі і під парами НДМГ – 14 років)

№ іспиту	Температура, °С	Показники п'єзометрів, мм						Висота газового об'єму під сіткою, мм			КУЗ, мм ст. роб. рід.	
		Одиночний прорив			Масовий прорив			$P_{зниз.}, \text{ кгс/см}^2$	$\Delta h_p, \text{ мм}$	$h_e, \text{ мм}$	одиночний прорив	масовий прорив
		під сіткою	над сіткою	різниця	під сіткою	над сіткою	різниця					
СРФ 1, сітка №008 (іспити в день монтажу)												
1	2-5	119	20	99	113	20	93	1	2,5	22	121	115
2		120	20	100	114	21	93	1	3	24	124	117
3		119	21	98	114	21	93	1	2,5	22	120	115
1	7-9,8	115	21	94	111	21	90	1	2,5	22	116	112
2		115	21	94	112	21	91	1	3	24	118	115
3		116	22	94	111	22	89	1	3	24	118	113
1	12-13,8	114	22	92	108	22	86	1	4	28,8	120,8	114,8
2		113	23	90	109	23	86	1	3	24	114	110
3		113	23	90	109	23	86	1	3	24	114	110

СРФ 1, сітка №008 (іспити після 7 тижнів витримки у КП)												
1	2-6,5	111	17	94	107	17	90	1	3	24	118	114
2		116	20	96	112	20	92	1	2,5	22	118	114
3		117	16	101	112	16	96	1	2	18	119	114
СРФ 2, сітка №008 (іспити в день монтажу)												
1	3-4	120	26	94	116	26	90	1	2	18	112	108
2		121	25	96	117	25	92	1	2	18	114	110
3		120	25	95	117	25	92	1	2	18	113	110
1	8-11	111	22	89	108	22	86	1,25	2,5	20,5	109,5	106,5
2		108	23	85	105	23	82	1	2,5	22	107	104
3		121	28	93	117	28	89	1,05	2	17,5	110,5	106,5
1	13-14	109	17	92	106	17	89	1	3,5	27	119	116
2		117	25	92	115	25	90	1,1	3	23	115	113
3		116	23	93	114	23	91	1	3	24	117	115
СРФ 2, сітка №008 (іспити після 7 тижнів витримки у КП)												
1	10,5-11	122	32	90	118	32	86	1	1,5	15	105	101
2		124	32	92	119	32	87	1	1,5	15	107	102
3		123	32	91	119	32	87	1	1,5	15	106	102
СРФ 3, сітка №008 (іспити в день монтажу)												
1	3	97	29	68	111	29	82	0,85	2,5	11	79	93
2		96	29	67	111	29	82	0,95	3	12,5	79,5	94,5
3		97	27	70	109	29	80	0,95	3	12,5	82,5	92,5
1	10	93	30	63	106	30	76	0,95	3	12,5	75,5	88,5
2		96	29	67	107	30	77	1	3	12	79	89
3		91	30	61	106	30	76	0,95	3	12,5	73,5	88,5
1	13,5	91	30	61	104	32	72	0,95	3	12,5	73,5	84,5
2		91	30	61	104	31	73	0,85	2,5	11	72	84
3		91	30	61	104	31	73	0,95	3	12,5	73,5	85,5
СРФ 3, сітка №008 (іспити після 7 тижнів витримки у КП)												
1	9	86	23	63	99	23	76	1	2	9	72	85
2		86	22	64	100	23	77	1	2	9	73	86
3		88	22	66	99	23	76	1	2,5	10,5	76,5	86,5

Таблиця 3

Результати визначення КУЗ СРФ з комплекту зразків №9 (термін перебування в рідкій фазі і під парами АТ – 15 років)

№ іспиту	Температура, °С	Показники п'єзометрів, мм						Висота газового об'єму під сіткою, мм			КУЗ, мм ст. роб. рід.	
		Одиночний прорив			Масовий прорив			$P_{зніж.}$, кгс/см ²	Δh_p , мм	h_2 , мм	одиночний прорив	масовий прорив
		під сіткою	над сіткою	різниця	під сіткою	над сіткою	різниця					
СРФ 1, сітка №008 (іспити в день монтажу)												
1	7	249	195	54	250	195	55	1	1	9	63	64
2		250	195	55	253	195	58	1	1,5	13	68	71
3		252	195	57	257	195	62	1	1,5	13	70	75
1	10	245	192	53	247	192	55	1	1,5	13	66	68
2		248	191	57	250	191	59	1	1	9	66	68
3		247	191	56	255	191	64	1	1	9	65	73
1	16	245	194	51	248	194	54	1	2	17	68	71
2		235	195	40	240	195	45	1	2	17	57	62
3		246	194	52	247	194	53	1	2	17	69	70
СРФ 1, сітка №008 (іспити після 7 тижнів витримки у КП)												
1	14	242	192	50	245	192	53	1	1,5	13	63	66
2		243	191	52	243	191	52	1	2	17	69	69
3		245	192	53	242	192	50	1	1,5	13	66	63
СРФ 2, сітка №008 (іспити в день монтажу)												
1	5	250	195	55	254	195	59	1	2,5	21	76	80
2		249	195	54	256	195	61	1	3	24	78	85
3		252	195	57	255	195	60	1	3	24	81	84
1	8,5	251	193	58	252	194	58	1	2,5	21	79	79
2		252	195	57	253	195	58	1	2	17	74	75
3		251	195	56	253	195	58	1	2	17	73	75
1	13	252	195	57	253	195	58	1	1,5	13	70	71
2		253	195	58	254	195	59	1	2	17	75	76
3		253	195	58	252	195	57	1	2	17	75	74
СРФ 2, сітка №008 (іспити після 7 тижнів витримки у КП)												
1	17	240	195	45	230	195	35	1	4	26	71	61
2		245	192	53	245	192	53	1	4	26	79	79
3		247	192	55	245	192	53	1	4	26	81	79

СРФ 3, сітка №008 (іспити в день монтажу)												
1	7	---	---	---	245	193	52	1	2	7	---	59
2		240	194	46	237	194	43	1	1	5	51	48
3		---	---	---	250	193	57	1	2	6	---	63
1	11	245	195	50	255	195	60	1	4	18	68	78
2		240	195	45	240	195	45	1	4	18	63	63
3		237	194	43	257	194	63	1	4	14	57	77
1	16	235	195	40	236	195	41	1	3	11	51	52
2		238	195	43	233	195	38	1	4	15	58	53
3		---	---	---	238	195	43	1	3	11	---	54
СРФ 3, сітка №008 (іспити після 7 тижнів витримки у КП)												
1	17	---	---	---	240	192	48	1	1	3	---	51
2		---	---	---	248	192	56	1	1	3	---	59
3		---	---	---	245	192	53	1	1	3	---	56

Таблиця 4

Результати визначення КУЗ СРФ з комплекту зразків №9 (термін перебування в рідкій фазі і під парами НДМГ – 15 років)

№ іспиту	Температура, °С	Показники п'єзометрів, мм						Висота газового об'єму під сіткою, мм			КУЗ, мм ст. роб. рід.	
		Одиночний прорив			Масовий прорив			$P_{зміс.}, \text{кгс/см}^2$	$\Delta h_p, \text{мм}$	$h_2, \text{мм}$	одиночний прорив	масовий прорив
		під сіткою	над сіткою	різниця	під сіткою	над сіткою	різниця					
СРФ 1, сітка №008 (іспити в день монтажу)												
1	5	96	22	74	98	22	76	1	4	30	104	106
2		95	22	73	100	24	76	1	4	30	103	106
3		99	21	78	104	22	82	1	3	25	103	107
1	8	104	20	84	106	20	86	1	2	19	103	105
2		104	20	84	105	20	85	1	2	19	103	104
3		104	20	84	105	20	85	1	1,5	15	99	100
1	13	104	22	82	106	22	84	1	1,5	15	97	99
2		103	22	81	106	22	84	1	1,5	15	96	99
3		104	21	83	105	22	83	1	2	19	102	102
СРФ 1, сітка №008 (іспити після 7 тижнів витримки у КП)												
1	10	103	21	82	105	21	84	1	1,5	15	97	99
2		103	21	82	104	21	83	1	2	19	101	102
3		106	21	82	108	21	87	1	2	19	104	106

СРФ 2, сітка №008 (іспити в день монтажу)												
1	4	113	23	90	112	23	89	1	2	19	109	108
2		111	22	89	113	22	91	1	2	19	108	110
3		111	22	89	114	22	92	1	1,5	15	104	107
1	8,5	113	23	90	108	23	85	1	1,5	15	105	100
2		110	24	86	109	24	85	1	1,5	15	101	100
3		114	23	91	110	24	86	1	2	19	110	105
1	16	116	22	94	111	22	89	1	2	19	113	108
2		118	22	96	113	21	92	1	1,5	15	111	107
3		115	21	94	110	21	89	1	2	19	113	108
СРФ 2, сітка №008 (іспити після 7 тижнів витримки у КП)												
1	10	116	20	96	113	20	93	1	1	8	104	101
2		118	20	98	112	20	92	1	1,5	15	113	107
3		119	20	99	113	20	93	1	1,5	15	114	108
СРФ 3, сітка №008 (іспити в день монтажу)												
1	5	---	---	---	91	12	79	1	2	7	---	86
2		---	---	---	91	15	76	1	2	7	---	83
3		121	15	106	95	15	80	1	2	10	116	90
1	10	96	24	72	85	25	60	1	2	7	79	67
2		89	23	66	93	26	67	1	1	6	72	73
3		92	23	69	93	25	68	1	1	4	73	72
1	14	93	25	68	95	26	69	1	1	4	72	73
2		88	24	64	90	26	64	1	2	10	74	74
3		86	24	62	84	26	58	1	2	7	68	65
СРФ 3, сітка №008 (іспити після 7 тижнів витримки у КП)												
1	9	85	22	63	86	22	64	1	2	11	74	75
2		93	25	68	95	25	70	1	1	3	71	73
3		88	26	62	94	26	68	1	2	7	69	75

Таблиця 5

Результати визначення КУЗ СРФ з комплекту зразків №10 (термін перебування в рідкій фазі і під парами АТ – 15 років і 2 місяця)

№ іспиту	Температура, °С	Показники п'єзометрів, мм						Висота газового об'єму під сіткою, мм			КУЗ, мм ст. роб. рід.	
		Одиночний прорив			Масовий прорив			$P_{зміж.}$, кгс/см ²	Δh_p , мм	h_c , мм	одиночний прорив	масовий прорив
		під сіткою	над сіткою	різниця	під сіткою	над сіткою	різниця					
СРФ 1, сітка №008 (іспити в день монтажу)												
1	15	123	74	49	128	74	54	1	3	23	72	77
2		124	74	50	127	74	53	1	2,5	21	71	74
3		122	74	48	127	74	53	1	2	16	64	69
СРФ 1, сітка №008 (іспити після 7 тижнів витримки у КП)												
1	10	123	71	52	125	72	53	0,9	2	17	69	70
2		124	71	53	126	71	55	0,9	3	24	77	79
3		123	71	52	126	71	55	1	2	16	68	71
1	4	119	68	51	121	68	53	1,05	2	16	67	68
2		119	69	50	120	69	51	1	2,5	21	71	72
3		119	68	51	121	68	53	0,9	1,5	12	63	65
СРФ 2, сітка №008 (іспити в день монтажу)												
1	9	121	72	49	123	72	51	1	1,5	11	60	62
2		122	72	50	125	72	53	1	1,5	11	61	64
3		121	72	49	124	72	52	1,05	1,5	10,5	59,5	62,5
СРФ 2, сітка №008 (іспити після 7 тижнів витримки у КП)												
1	7	121	71	50	124	71	53	1	2	16	66	69
2		120	71	49	129	71	51	1	2	16	65	67
3		120	71	49	122	71	51	1	2	16	65	67
СРФ 3, сітка №008 (іспити в день монтажу)												
1	9	111	70	41	113	70	43	1,05	2,5	9,5	50,5	52,5
2		111	70	41	114	70	44	0,95	3,5	12,6	53,6	56,6
3		110	70	40	114	70	44	1	3	11,2	51,2	55,2
СРФ 3, сітка №008 (іспити після 7 тижнів витримки у КП)												
1	1	107	67	40	112	67	45	1	2	7,5	47,5	52,5
2		106	67	39	112	67	45	1,08	2	7,3	46,3	52,3
3		107	67	40	111	67	44	1	2	7,5	47,5	51,5

Таблиця 6

Результати визначення КУЗ СРФ з комплекту зразків №10 (термін перебування в рідкій фазі і під парами НДМГ – 15 років і 2 місяця)

№ іспиту	Температура, °С	Показники п'єзометрів, мм						Висота газового об'єму під сіткою, мм			КУЗ, мм ст. роб. рід.	
		Одиночний прорив			Масовий прорив			$P_{зніж.}, \text{кгс/см}^2$	$\Delta h_{p2}, \text{мм}$	$h_{z2}, \text{мм}$	одиночний прорив	масовий прорив
		під сіткою	над сіткою	різниця	під сіткою	над сіткою	різниця					
СРФ 1, сітка №008 (іспити в день монтажу)												
1	15	122	21	101	124	21	103	1	2	18	119	121
2		123	20	103	126	20	106	1	1,5	12,5	115,5	118,5
3		123	20	103	126	20	106	1	1,5	12,5	115,5	118,5
СРФ 1, сітка №008 (іспити після 7 тижнів витримки у КП)												
1	12	124	17	107	127	17	110	0,95	1,5	12,5	119,5	122,5
2		125	17	108	127	17	110	0,85	1,5	13,5	121,5	123,5
3		125	17	108	127	17	110	0,95	1,5	12,5	120,5	122,5
СРФ 2, сітка №008 (іспити в день монтажу)												
1	9	117	20	97	118	20	98	0,95	2	18	115	116
2		117	20	97	118	20	98	0,95	1,5	13	110	111
3		116	21	95	118	21	97	1	2	18	113	115
СРФ 2, сітка №008 (іспити після 7 тижнів витримки у КП)												
1	7	115	20	95	113	20	93	0,95	2	18	113	111
2		114	19	95	112	19	93	0,95	1,5	13	108	106
3		113	19	94	115	19	96	0,95	2	18	112	114
СРФ 3, сітка №008 (іспити в день монтажу)												
1	9	92	16	76	94	17	77	0,95	3	12	88	89
2		96	21	75	95	21	74	1,05	4	16,5	91,5	90,5
3		95	21	74	97	21	76	1	3	12	86	88
СРФ 3, сітка №008 (іспити після 7 тижнів витримки у КП)												
1	1	94	19	75	93	19	74	0,95	3	12	87	86
2		95	19	76	94	20	74	0,95	4	18	94	92
3		95	19	76	94	19	75	0,95	3	12	88	87

Таблиця 7

Результати визначення КУЗ СРФ з комплекту зразків №11 (термін перебування в рідкій фазі і під парами АТ – 15 років і 2 місяця)

№ іспиту	Температура, °С	Показники п'єзометрів, мм						Висота газового об'єму під сіткою, мм			КУЗ, мм ст. роб. рід.	
		Одиночний прорив			Масовий прорив			$P_{зміж}$, кгс/см ²	Δh_p , мм	h_2 , мм	одиночний прорив	масовий прорив
		під сіткою	над сіткою	різниця	під сіткою	над сіткою	різниця					
СРФ 1, сітка №008 (іспити в день монтажу)												
1	5	119	67	52	123	67	56	1	2	15,5	67,5	71,5
2		120	67	53	122	67	55	1,05	2	14,5	67,5	69,5
3		121	67	54	122	67	55	1	2	15,5	69,5	69,5
1	10	115	67	48	117	67	50	1	2	15,5	63,5	65,5
2		118	67	51	120	67	53	1	1,5	10,3	61,3	63,3
3		117	67	50	118	67	51	1	2	15,5	65,5	66,5
1	14,5	113	67	46	115	67	48	1	2	15,5	61,5	63,5
2		113	65	48	114	65	49	1	1,5	10,3	58,3	59,3
3		112	65	47	114	65	49	1	1,5	10,3	57,3	59,3
СРФ 1, сітка №008 (іспити після 7 тижнів витримки у КП)												
1	8.5	108	63	45	111	63	48	1	2	15,5	60,5	63,5
2		110	63	47	112	63	49	1	1.5	10,3	57,3	59,3
3		110	63	47	111	63	48	1	1.5	10,3	57,3	58,3
СРФ 2, сітка №008 (іспити в день монтажу)												
1	15	100	60	40	102	60	42	1	1,5	8,5	48,5	50,5
2		118	75	43	120	75	45	1	2	8,5	51,5	53,5
3		120	75	45	121	75	46	1	1,5	8,5	53,5	54,5
1	10	124	75	49	125	75	50	1	1,5	8,5	57,5	58,5
2		123	75	48	127	75	52	1	2	10,3	58,5	62,3
3		123	74	49	124	74	50	1	2	10,3	59,3	60,3
1	5	120	76	44	124	76	48	1,1	2	10,3	54,3	58,3
2		121	76	45	123	76	47	1	1,5	8,5	53,5	55,5
3		121	76	45	123	76	47	1	1,5	8,5	53,5	55,5
СРФ 2, сітка №008 (іспити після 7 тижнів витримки у КП)												
1	15	109	70	39	112	70	42	1	2	15,5	54,5	57,5
2		111	70	41	113	70	43	1	2,5	9,4	50,4	52,4
3		113	71	42	114	71	43	1	2	15,5	57,5	58,5

СРФ 3, сітка №008 (іспити в день монтажу)												
1	15	---	---	---	105	70	35	1	2,5	9,4	---	44,4
2		---	---	---	103	70	33	1	2	6,9	---	39,9
3		---	---	---	104	70	34	1	2	6,9	---	40,9
1	10	---	---	---	106	70	36	1	2	6,9	---	42,9
2		---	---	---	107	70	37	1,05	2	6,5	---	43,5
3		---	---	---	104	70	34	1	2	6,9	---	40,9
1	5	---	---	---	108	70	38	1	2,5	9,4	---	47,4
2		---	---	---	107	70	37	1	2	6,9	---	43,9
3		---	---	---	109	70	39	1	2	6,9	---	45,9
СРФ 3, сітка №008 (іспити після 7 тижнів витримки у КП)												
1	15	---	---	---	98	71	27	1	2	6,9	---	33,9
2		---	---	---	100	70	30	1	1,5	4,4	---	34,4
3		---	---	---	99	67	32	1	2	6,9	---	38,9

Таблиця 8

Результати визначення КУЗ СРФ з комплексу зразків №11 (термін перебування в рідкій фазі і під парами НДМГ – 15 років і 2 місяця)

№ іспиту	Температура, °С	Показники п'єзометрів, мм						Висота газового об'єму під сіткою, мм			КУЗ, мм ст. роб. рід.	
		Одиночний прорив			Масовий прорив			$P_{знизж.}$, кгс/см ²	Δh_p , мм	h_e , мм	одиночний прорив	масовий прорив
		під сіткою	над сіткою	різниця	під сіткою	над сіткою	різниця					
СРФ 1, сітка №008 (іспити в день монтажу)												
1	14	102	11	91	105	11	94	1	2	17,5	108,5	109,5
2		97	11	86	99	11	88	1	2	17,5	103,5	103,5
3		102	12	88	102	12	90	1	2	17,5	105,5	105,5
1	10	95	14	81	98	14	84	1	3	24,3	105	106,3
2		96	13	83	98	13	85	1	2,5	22,3	105	105,3
3		100	13	87	102	13	89	1	2	17,5	104,5	104,5
1	3	100	10	90	98	10	88	1	2	17,5	107,5	103,5
2		99	10	89	102	10	92	1	3	24,3	113	114,3
3		97	11	86	98	11	87	1	2	17,5	103,5	102,5
СРФ 1, сітка №008 (іспити після 7 тижнів витримки у КП)												
1	8	102	15	87	103	15	88	1	1,5	12,5	99,5	98,3
2		103	15	88	104	15	89	1	2	15,5	103,5	104,5
3		103	15	88	105	15	90	1	2	15,5	103,5	105,5

СРФ 2, сітка №008 (іспити в день монтажу)												
1	15	105	12	93	103	12	91	1	1,5	10,3	103,5	101,3
2		103	12	91	104	12	92	1	2	15,5	106,5	107,5
3		102	12	90	104	12	92	1	1,5	10,3	100,3	102,3
1	10	102	12	90	100	12	88	1	2	15,5	105,5	103,5
2		105	11	94	104	11	93	1	1,5	10,3	104,3	103,3
3		102	11	91	103	11	92	1	2	15,5	106,5	107,5
1	5	103	12	91	104	12	92	1	2	15,5	106,5	107,5
2		106	11	95	106	11	95	1	1,5	10,3	105,3	105,3
3		107	11	96	108	11	97	1	2	15,5	111,5	112,5
СРФ 2, сітка №008 (іспити після 7 тижнів витримки у КП)												
1	5	103	11	92	105	11	94	1	1,5	10,3	102,3	104,3
2		104	11	93	105	11	94	1	1,5	8,5	101,5	102,5
3		107	11	96	108	11	97	1,05	2	14,5	110,5	111,5
СРФ 3, сітка №008 (іспити в день монтажу)												
1	15	93	18	75	100	18	82	1	1,5	5,4	80,4	87,4
2		95	18	77	98	18	80	1,05	2	7,5	84,5	87,5
3		93	18	75	97	18	79	1	2	7,9	82,9	86,9
1	10	108	23	85	110	23	87	1,05	2,5	9,9	94,9	96,9
2		105	19	86	106	19	87	1	2	7,9	93,9	94,9
3		100	20	86	107	20	87	1	2	7,9	93,9	94,9
1	5	105	18	87	106	18	88	1,05	2	7,5	94,5	95,5
2		105	19	86	104	19	85	1	2	5,4	91,4	90,4
3		98	17	81	103	17	86	1	2	7,9	88,9	93,9
СРФ 3, сітка №008 (іспити після 7 тижнів витримки у КП)												
1	15	85	20	65	93	20	73	1	2,5	10,2	75,2	83,2
2		88	19	69	95	19	76	1	2	7,9	76,9	83,9
3		83	19	64	92	19	73	1	2	7,9	71,9	80,9

Таблиця 9

Результати визначення КУЗ СРФ з комплекту зразків №12 (термін перебування в рідкій фазі і під парами АТ – 17 років і 5 місяців)

№ іспиту	Температура, °С	Показники п'єзометрів, мм						Висота газового об'єму під сіткою, мм			КУЗ, мм ст. роб. рід.	
		Одиночний прорив			Масовий прорив			$P_{звж.}$, кгс/см ²	Δh_p , мм	h_2 , мм	одиночний прорив	масовий прорив
		під сіткою	над сіткою	різниця	під сіткою	над сіткою	різниця					
СРФ 1, сітка №008 (іспити в день монтажу)												
1	4	---	---	---	258	196	62	1	3	22,8	---	84,8
2	6	---	---	---	264	196	68	1	2,5	20,2	---	88,2
3	6	---	---	---	270	196	74	1	2	17,1	---	91,1
1	10	230	196	34	265	196	69	1	2,5	20,2	54,2	89,2
2		---	---	---	250	196	54	1	1,5	13,5	---	67,5
3		---	---	---	260	195	65	1	2	16,2	---	81,2
1	14	250	195	55	255	195	60	1	2	16,2	71,2	76,2
2		---	---	---	250	195	55	1	1,5	13,5	---	68,5
3		---	---	---	260	195	65	1	1,5	13,5	---	78,2
СРФ 1, сітка №008 (іспити після 7 тижнів витримки у КП)												
1	4,5	250	194	56	255	194	61	1	1,5	13,5	69,5	74,5
2		---	---	---	250	194	56	1	1,5	13,6	---	69,6
3		---	---	---	260	194	66	1	1,5	11,6	---	77,6
1	11	---	---	---	247	196	51	1	2,5	20,4	---	71,4
2		---	---	---	230	196	34	1	3	23,4	---	57,4
3		---	---	---	235	196	39	1	3	24	---	63
1	14	250	196	54	230	196	34	1	2,5	20,2	74,2	54,2
2		---	---	---	235	196	39	1	2,5	20,8	---	59,8
3		230	196	34	245	196	49	1	2	18	52	67
СРФ 2, сітка №008 (іспити в день монтажу)												
1	5	---	---	---	245	195	50	1	2	17,9	---	67,9
2		---	---	---	250	194	56	1	2	17,5	---	73,5
3		---	---	---	248	194	54	1	2	17,5	---	71,5
1	12	---	---	---	228	197	31	1	3	22,6	---	53,6
2		---	---	---	232	197	35	1	2,5	20,9	---	55,9
3		---	---	---	235	196	39	1	2	17,8	---	56,8
1	16	---	---	---	230	198	32	1	3	23,2	---	55,2
2		---	---	---	230	197	33	1	2,5	22,2	---	55,2
3		---	---	---	228	197	31	1	2	18	---	49

СРФ 2, сітка №008 (іспити після 7 тижнів витримки у КП)												
1	7	---	---	---	240	195	45	1	3	22,5	---	67,5
2		---	---	---	260	193	67	1	1,5	13,5	---	80,5
3		---	---	---	238	193	45	1	2	17	---	62
СРФ 3, сітка №008 (іспити в день монтажу)												
1	5	---	---	---	248	198	50	1	4	22,4	---	72,4
2		---	---	---	249	196	53	1	3	19,7	---	72,7
3		---	---	---	245	196	49	1	3	15,2	---	64,2
1	10	---	---	---	245	200	45	1	3,5	18,3	---	63,3
2		---	---	---	243	197	46	1	3	10,2	---	56,2
3		---	---	---	242	198	44	1	2,5	15	---	59
1	14	---	---	---	240	203	37	1	4	22,5	---	59,5
2		---	---	---	245	200	45	1	3	15	---	60
3		---	---	---	243	200	43	1	3	15	---	58
СРФ 3, сітка №008 (іспити після 7 тижнів витримки у КП)												
1	4	---	---	---	244	196	48	1	2,5	10	---	58
2		---	---	---	253	197	56	1	3	15,2	---	71,2
3		---	---	---	255	197	58	1	3	15,2	---	73,2

Таблиця 10

Результати визначення КУЗ СРФ з комплекту зразків №12 (термін перебування в рідкій фазі і під парами НДМГ – 17 років і 5 місяців)

№ іспиту	Температура, °С	Показники п'езометрів, мм						Висота газового об'єму під сіткою, мм			КУЗ, мм ст. роб. рід.	
		Одиночний прорив			Масовий прорив			$P_{\text{зніж.}}$, кгс/см ²	Δh_p , мм	$h_{\text{г}}$, мм	одиночний прорив	масовий прорив
		під сіткою	над сіткою	різниця	під сіткою	над сіткою	різниця					
СРФ 1, сітка №008 (іспити в день монтажу)												
1	5	150	47	103	150	47	103	1	2	19	122	142
2		148	47	101	150	47	103	1	1	11,1	112,1	114,1
3		145	47	98	150	47	103	1	1,5	15,5	113,5	118,5
1	9	137	67	70	141	67	74	1	1,5	15	85	89
2		120	67	53	140	67	73	1	1,5	14,8	67,8	87,8
3		135	45	90	140	45	95	1	1,5	15	105	110
1	15	140	50	90	160	50	110	1	1	10,5	100,5	120,5
2		145	48	97	145	48	97	1	1	10,9	107,9	107,9
3		145	48	97	145	48	97	1	1	10,8	107,8	107,8

СРФ 1, сітка №008 (іспити після 7 тижнів витримки у КП)												
1	6	120	24	96	135	24	111	1	1,5	13,7	109,7	124,7
2		119	24	95	85	24	83	1	2	17,8	112,8	78,8
3		118	24	94	80	25	61	1	2	18	112	73
1	9	118	24	94	120	24	96	1	1,5	13,7	107,7	109,7
2		116	24	92	135	24	111	1	1,5	13,7	105,7	124,7
3		105	24	81	120	24	96	1	1,5	13,7	94,7	109,7
1	16	127	28	99	128	29	99	1	1,5	14	113	113
2		122	28	94	80	31	49	1	2	18	112	67
3		114	28	39	75	30	45	1	2,5	21,1	107,1	66,1
СРФ 2, сітка №008 (іспити в день монтажу)												
1	4	123	21	102	132	21	111	1	2	18,6	120,6	129,6
2		110	24	86	70	26	44	1	3,5	27,5	113,5	71,5
3		108	23	85	80	23	57	1	2,5	21,1	106,1	78,1
1	9	---	---	---	87	23	64	1	1	11,6	---	75,6
2		140	23	117	78	24	54	1	1,5	15	132	69
3		103	23	80	73	24	49	1	1,5	14,9	94,9	63,9
1	15	123	24	99	78	26	52	1	2,5	21,9	120,9	73,9
2		107	25	82	83	25	58	1	2	18,2	100,2	76,2
3		112	23	89	91	25	66	1	1,5	14,8	103,8	80,8
СРФ 2, сітка №008 (іспити після 7 тижнів витримки у КП)												
1	6	104	20	84	68	20	48	1	1	10,5	94,5	58,5
2		133	20	92	92	20	72	1	1	10,5	123,5	82,5
3		110	18	92	110	18	92	1	1	12,9	104,9	104,9
1	9	98	23	75	78	23	55	1	3	24,2	99,2	79,2
2		107	20	87	84	20	64	1	1	10,5	97,5	74,5
3		110	19	91	92	19	73	1	1	10,6	101,6	83,6
1	15	112	21	91	98	21	77	1	1	11,5	102,3	88,5
2		116	22	94	84	22	62	1	1,5	14,8	108,8	76,8
3		120	22	98	85	22	63	1	1,5	14,8	112,8	77,8
СРФ 3, сітка №008 (іспити в день монтажу)												
1	5	---	---	---	113	26	87	1	3,5	22,2	---	109,2
2		---	---	---	106	24	82	1	3	17	---	99
3		---	---	---	91	25	66	1	3	18	---	84
1	12	---	---	---	90	26	64	1	3	17	---	81
2		---	---	---	89	26	63	1	3,5	21,7	---	84,7
3		---	---	---	83	27	56	1	5	32,2	---	88,2
1	15	---	---	---	98	26	72	1	3	16	---	88
2		---	---	---	105	26	79	1	3,5	23,6	---	102,6
3		---	---	---	98	27	71	1	4	17,5	---	88,5

СРФ 3, сітка №008 (іспити після 7 тижнів витримки у КП)												
1	5	---	---	---	100	24	76	1	2,5	15,5	---	91,5
2		---	---	---	94	23	71	1	3	18,5	---	89,5
3		---	---	---	91	23	68	1	3,5	23,4	---	91,4

Таблиця 11

Результати визначення КУЗ СРФ з комплекту зразків №13 (термін перебування в рідкій фазі і під парами АТ – 20 років)

№ іспиту	Температура, °С	Показники п'єзометрів, мм						Висота газового об'єму під сіткою, мм			КУЗ, мм ст. роб. рід.	
		Одиночний прорив			Масовий прорив			$P_{зникс}, \text{кгс/см}^2$	$\Delta h_p, \text{мм}$	$h_z, \text{мм}$	одиночний прорив	масовий прорив
		під сіткою	над сіткою	різниця	під сіткою	над сіткою	різниця					
СРФ 1, сітка №008 (іспити в день монтажу)												
1	5	---	---	---	248	195	53	0,004	4,5	18,2	---	71,2
2		---	---	---	252	190	62	0,004	2,5	11	---	73
3		---	---	---	247	190	57	0,004	3	13	---	70
1	10	240	190	50	250	190	60	0,005	2,5	11	61	71
2		238	190	48	248	190	58	0,005	2,5	11	59	69
3		242	190	52	250	190	60	0,005	2,5	11	63	71
1	15	---	---	---	235	194	41	0,01	5	18,8	---	59,8
2		---	---	---	248	192	56	0	4,5	18,2	---	74,2
3		---	---	---	237	195	42	0,005	5,5	21	---	63
СРФ 1, сітка №008 (іспити після 7 тижнів витримки у КП)												
1	15	238	186	52	245	186	59	0	2	9	61	68
2		237	186	51	248	186	62	0	2,5	10,9	61,9	72,9
3		235	186	49	243	186	57	0	2	9	58	66
СРФ 2, сітка №008 (іспити в день монтажу)												
1	5	250	189	70,1	253	189	64	0,03	2	9,1	70,1	73,1
2		248	189	70,1	244	189	55	0,03	2,5	11,1	70,1	66,1
3		235	189	59,2	245	189	56	0,04	3	13,2	59,2	69,2
1	12	235	189	63	239	189	50	0,02	4	17	63	67
2		245	189	69	247	189	58	0,03	3	13	69	71
3		241	191	61,5	242	191	51	0,06	2,5	11,5	61,5	62,5
1	15	242	190	61,4	242	190	52	0,07	2	9,4	61,4	61,4
2		247	189	67,4	242	189	53	0,07	2	9,4	67,4	62,4
3		250	189	66	240	189	51	0,08	1	5	66	56

СРФ 2, сітка №008 (іспити після 7 тижнів витримки у КП)												
1	10	245	188	57	248	188	60	0,05	1,5	7	61,8	64,8
2		242	188	54	245	188	57	0,04	1,5	7	61	64
3		244	188	56	247	188	59	0,04	1,5	7	63	66
СРФ 3, сітка №008 (іспити в день монтажу)												
1	5	238	190	48	245	190	55	0,015	3	13	61	68
2		238	190	48	245	190	55	0,02	3	13,1	61,1	68,1
3		238	190	48	244	190	54	0,02	2,5	11,2	59,2	65,2
1	10	240	190	50	248	190	58	0,04	4	17,2	67,2	75,2
2		240	190	50	243	190	53	0,06	3	13,8	63,8	66,8
3		239	189	50	242	189	53	0,04	3	13,5	63,5	66,5
1	15	243	194	49	248	194	54	0,09	2	9,8	58,8	63,8
2		241	194	47	244	194	50	0,1	2	9,9	56,9	59,9
3		242	194	48	244	194	50	0,08	2	9,5	57,5	59,5
СРФ 3, сітка №008 (іспити після 7 тижнів витримки у КП)												
1	10	239	187	52	243	187	56	0,06	2	9,3	61,3	65,3
2		240	187	53	245	187	58	0,07	2	9,3	62,3	67,3
3		240	187	53	245	187	58	0,07	2	9,3	62,3	67,3

Таблиця 12

Результати визначення КУЗ СРФ з комплекту зразків №13 (термін перебування в рідкій фазі і під парами НДМГ – 20 років)

№ іспиту	Температура, °С	Показники п'єзометрів, мм						Висота газового об'єму під сіткою, мм			КУЗ, мм ст. роб. рід.	
		Одиночний прорив			Масовий прорив			$P_{\text{зніж.}}, \text{ кгс/см}^2$	$\Delta h_p, \text{ мм}$	$h_{\text{г}}, \text{ мм}$	одиночний прорив	масовий прорив
		під сіткою	над сіткою	різниця	під сіткою	над сіткою	різниця					
СРФ 1, сітка №008 (іспити в день монтажу)												
1	5	152	58	94	162	58	104	0,02	4,5	29	123	133
2		150	58	92	155	58	97	0,02	4,5	29	121	126
3		145	58	87	155	58	97	0,02	4,5	29	116	126
1	10	150	58	92	155	58	97	0,02	3,5	25,2	117	122,2
2		152	58	94	157	58	99	0,02	3,5	25,2	119	124,2
3		140	58	82	150	58	82	0,02	3,5	25,2	107	117,2
1	15	138	58	80	148	58	90	0,02	2,5	20,5	101	110,5
2		142	58	84	151	58	93	0,02	2,5	20,5	105	113,5
3		141	58	83	149	58	91	0,02	2,5	20,5	104	111,5

СРФ 1, сітка №008 (іспити після 7 тижнів витримки у КП)												
1	10	152	58	94	155	58	97	0,01	1,5	14,2	108	111,2
2		140	58	82	153	58	95	0,01	1,5	14,2	96,2	109,2
3		144	58	86	147	58	89	0,01	1,5	14,2	100	103,2
СРФ 2, сітка №008 (іспити в день монтажу)												
1	5	132	66	66	135	66	69	0	4	27	93	96
2		150	61	89	160	61	99	0	2	17,8	107	116,8
3		144	64	80	142	64	78	0	5	30,5	11	108,5
1	10	139	60	79	147	60	87	0	2	17,8	96,8	104,8
2		140	60	80	146	60	86	0	1,5	14,2	94,2	100,2
3		142	60	82	147	60	87	0	1,5	14,2	96,8	101,2
1	15	145	61	84	151	61	90	0	1	10	94	100
2		140	62	78	135	62	73	0	1,5	14,2	92,2	87,2
3		142	62	80	146	61	85	0	1	10	90	95
СРФ 2, сітка №008 (іспити після 7 тижнів витримки у КП)												
1	10	143	60	83	148	60	88	0,01	2	18	101	106
2		143	60	83	148	60	88	0,03	2	18	101	106
3		142	60	82	147	60	87	0,02	2	18	100	105
СРФ 3, сітка №008 (іспити в день монтажу)												
1	5	140	63	77	145	63	82	0,02	2,5	10,5	87,5	92,5
2		143	63	80	150	63	87	0,02	2,5	10,5	90,5	97,5
3		143	63	80	148	63	85	0,02	2,5	10,5	90,5	95,5
1	10	147	65	82	150	65	85	0,01	2	7,5	89,5	92,5
2		144	65	79	150	65	85	0,02	2	7,5	86,5	92,5
3		145	65	80	150	65	85	0,02	2	7,5	87,5	92,5
1	15	139	57	82	145	57	88	0,03	2	7,6	89,6	95,6
2		138	57	81	141	57	84	0,03	2	7,6	88,6	91,6
3		140	57	83	143	57	86	0,04	2	7,7	90,7	93,7
СРФ 3, сітка №008 (іспити після 7 тижнів витримки у КП)												
1	10	1	143	58	85	147	58	89	0,02	2	7,5	92,5
2		2	140	58	82	147	58	89	0,03	2	7,5	92,6
3		3	145	58	87	150	58	92	0,03	2	7,6	94,6

Результати визначення КУЗ СРФ з комплекту зразків №14 (термін перебування в рідкій фазі і під парами АТ – 20 років і 10 місяців)

№ іспиту	Температура, °С	Показники п'єзометрів, мм						Висота газового об'єму під сіткою, мм			КУЗ, мм ст. роб. рід.	
		Одиночний прорив			Масовий прорив			$P_{знизж.}$, кгс/см ²	Δh_p , мм	h_z , мм	одиночний прорив	масовий прорив
		під сіткою	над сіткою	різниця	під сіткою	над сіткою	різниця					
СРФ 1, сітка №008 (іспити в день монтажу)												
1	7	---	---	---	250	198	52	1	2,5	11,5	---	63,5
2		---	---	---	250	197	53	1	3	13,7	---	66,7
3		---	---	---	250	197	53	1	3	13,7	---	66,7
1	8	254	199	54	250	199	51	1	2	9	64,2	60,2
2		254	197	57	245	197	48	1	2	9	66,2	57,2
3		210	197	13	240	197	43	1	2,5	11,5	24,5	54,5
1	14	---	---	---	240	197	43	1	2	9	---	52,0
2		246	190	56	245	197	48	1	2,5	11,5	67,5	59,5
3		---	---	---	243	198	45,5	1	3	13,7	---	59,2
СРФ 1, сітка №008 (іспити після 7 тижнів витримки у КП)												
1	7	208	193	15	244	193	51	1	3	13,7	29	65
2		210	192	18	240	192	48	1	2	9	27,3	57,3
3		210	192	19	238	192	49	1	2	9	27,3	55,3
СРФ 2, сітка №008 (іспити в день монтажу)												
1	6	233	195	38	253	195	58	1	2	9	47,2	67,2
2		208	194	14	260	194	66	1	0,5	0	14	66
3		---	---	---	255	194	61	1	1,5	7	---	68
1	12	---	---	---	244	194	50	1	2	9	---	59,2
2		220	190	30	240	190	50	1	2	9	39,2	59,2
3		235	194	41	240	194	46	1	3	13,7	54,7	59,7
1	15	215	194	21	240	194	46	1	2	9	30,2	55,2
2		---	---	---	225	194	31	1	2	9	---	40,2
3		---	---	---	230	194	36	1	2	9	---	45,2
СРФ 2, сітка №008 (іспити після 7 тижнів витримки у КП)												
1	7	---	---	---	231	192	39	1	2,5	11,5	---	50,5
2		---	---	---	240	192	48	1	2,5	11,5	---	59,5
3		---	---	---	226	192	34	1	2,5	11,5	---	45,5

1	12	198	192	6	233	192	41	1	1,5	7	13	48
2		208	192	16	226	192	34	1	2	9	25,2	43,2
3		212	192	20	230	192	38	1	2	9	29,2	47,2
1	15	204	193	11	236	193	43	1	2	9	20,2	52,2
2		---	---	---	228	193	35	1	2	9	---	44,2
3		247	192	55	230	192	38	1	2	9	64,2	47,2
СРФ 3, сітка №008 (іспити в день монтажу)												
1	4	235	191	44	245	191	54	1	3	4,5	48,5	59
2		230	191	39	236	191	45	1	3	4,5	43,5	50
3		220	191	29	240	191	49	1	3	4,5	33,5	53,5
1	11	235	191	44	237	191	46	1	2	3	47	49,0
2		235	191	44	240	191	49	1	3	4,5	48,5	53,5
3		225	191	34	238	191	47	1	3	4,5	38,5	51,5
1	14	220	191	29	237	191	46	1	3	4,5	33,5	50,5
2		230	191	39	237	191	46	1	2	3,5	42	49
3		220	191	29	230	191	39	1	3	4,5	33,5	43,5
СРФ 3, сітка №008 (іспити після 7 тижнів витримки у КП)												
1	4	230	190	40	240	190	50	1	2,5	4	44	54
2		230	189	41	236	189	47	1	2	3,5	45	51
3		230	189	41	240	189	51	1	2	3,5	45	55

Таблиця 14

Результати визначення КУЗ СРФ з комплекту зразків №14 (термін перебування в рідкій фазі і під парами НДМГ – 20 років і 10 місяців)

№ іспиту	Температура, °С	Показники п'езометрів, мм						Висота газового об'єму під сіткою, мм			КУЗ, мм ст. роб. рід.	
		Одиночний прорив			Масовий прорив			$P_{\text{зніж.}}$, кгс/см ²	Δh_p , мм	h_e , мм	одиночний прорив	масовий прорив
		під сіткою	над сіткою	різниця	під сіткою	над сіткою	різниця					
СРФ 1, сітка №008 (іспити в день монтажу)												
1	7	150	59	91	150	59	91	1	1,5	8,3	99,3	99,3
2		147	58	89	147	58	88	1	1,5	8,3	97,3	97,3
3		147	58	89	147	58	87	1	2	10,6	99,6	99,6
1	10	150	61	89	152	61	92	1	1	6,5	95,5	97,5
2		150	61	89	140	61	80	1	1,5	8,3	97,6	87,6
3		155	61	89	150	61	90	1	2	11	105	100,0

1	16	145	61	84	145	61	84	1	2	10,6	94,6	94,6
2		135	60	75	135	60	74	1	2	10,6	85,6	97,6
3		147	60	87	147	60	86	1	2	10,6	97,6	85,6
СРФ 1, сітка №008 (іспити після 7 тижнів витримки у КП)												
1	7	165	57	108	148	57	91	1	2	10,6	118,6	101,6
2		150	56	94	147	56	91	1	2	10,6	104,6	101,6
3		155	58	97	150	58	92	1	2	10,6	107,6	102,6
СРФ 2, сітка №008 (іспити в день монтажу)												
1	6	140	66	74	155	66	89	1	1	6	80	95
2		149	63	86	152	63	89	1	2	10,6	96,6	99,6
3		145	63	82	152	63	89	1	2	10,6	92,6	99,6
1	10	152	64	88	150	64	86	1	2,5	13,5	101,5	99,5
2		158	63	95	155	63	92	1	1,5	8,7	103,7	100,7
3		160	63	97	150	63	87	1	1	6	103,3	93,3
1	16	120	67	53	140	67	73	1	2,5	13,5	65,8	85,8
2		127	65	62	145	65	80	1	1,5	8,7	70,3	88,3
3		120	66	54	145	66	73	1	2	10,6	64,6	89,6
СРФ 2, сітка №008 (іспити після 7 тижнів витримки у КП)												
1	6	150	60	90	158	60	98	1	1	6	96	104
2		142	65	77	144	65	79	1	3	15	92	94
3		132	63	69	151	63	88	1	1,5	8,3	77,3	96,3
СРФ 3, сітка №008 (іспити в день монтажу)												
1	3	143	64	79	147	64	83	1	2	3,5	82,5	86,5
2		140	65	75	150	65	85	1	2	3,5	78,5	88,5
3		137	66	71	145	66	79	1	3	5,5	76,5	84,5
1	8	130	64	66	145	64	81	1	2	3,5	69,5	84,5
2		130	64	66	145	64	81	1	2	3,5	69,5	84,5
3		130	66	64	145	66	79	1	3	5,5	69,5	84,5
1	13	135	63	72	145	63	82	1	2	3,5	75,5	85,5
2		135	62	73	140	62	78	1	1,5	2,5	75,5	80,5
3		135	63	72	140	63	77	1	2	3,5	75,5	80,5
СРФ 3, сітка №008 (іспити після 7 тижнів витримки у КП)												
1	8	135	64	71	142	64	78	1	3	5,5	76,0	83,0
2		140	64	76	145	64	81	1	3	5,5	81,0	86,0
3		140	62	78	143	62	81	1	2	3,5	82,0	85,0

Результати визначення КУЗ СРФ з комплекту зразків №15 (термін перебування в рідкій фазі і під парами АТ – 23 роки)

№ іспиту	Температура, °С	Показники п'єзометрів, мм						Висота газового об'єму під сіткою, мм			КУЗ, мм ст. роб. рід.	
		Одиночний прорив			Масовий прорив			$P_{злив.}$, кгс/см ²	Δh_p , мм	h_2 , мм	одиночний прорив	масовий прорив
		під сіткою	над сіткою	різниця	під сіткою	над сіткою	різниця					
СРФ 1, сітка №008 (іспити в день монтажу)												
1	5,9	---	---	---	225	196	29	1	3,5	25	---	54
2		242	190	52	248	195	53	1	2,5	21	73	74
3		---	---	---	235	195	40	1	2	17	---	57
1	12	248	190	58	245	195	50	1	2	17	75	67
2		243	190	53	238	195	43	1	2,5	21	74	64
3		---	---	---	235	196	39	1	2,5	21	---	60
1	15	---	---	---	240	197	43	1	3	24	---	67
2		---	---	---	238	195	43	1	2	17	---	60
3		---	---	---	242	195	47	1	2	17	---	64
СРФ 1, сітка №008 (іспити після 7 тижнів витримки у КП)												
1	6	250	187	63	240	187	53	1	1,5	13	76	66
2		---	---	---	235	188	47	1	2	17	---	64
3		---	---	---	223	189	34	1	3	23	---	57
1	11	---	---	---	230	189	41	1	2	17	---	58
2		---	---	---	234	189	45	1	2	17	---	62
3		---	---	---	235	189	46	1	1,5	13	---	59
1	14,5	280	191	89	229	191	38	1	3	22	111	60
2	15	---	---	---	225	191	34	1	3	22	---	56
3		---	---	---	234	189	45	1	1,5	13	---	58
СРФ 2, сітка №008 (іспити в день монтажу)												
1	7	---	---	---	240	198	42	1	2	17	---	59
2		---	---	---	244	199	45	1	3	22	---	67
3		---	---	---	243	198	45	1	2	17	---	62
1	9,5	254	194	60	254	199	55	1	2	17	77	72
2	10	---	---	---	247	199	48	1	2	17	---	65
3		242	190	52	250	199	51	1	2	17	69	68
1	14	250	196	54	254	201	53	1	2	17	71	70
2		---	---	---	245	200	45	1	2	17	---	62
3	14,5	238	196	42	248	201	47	1	2	17	59	64

СРФ 2, сітка №008 (іспити після 7 тижнів витримки у КП)												
1	4	---	---	---	257	198	59	1	2	17	---	76
2		254	190	64	254	196	58	1	2	17	81	75
3		---	---	---	242	197	45	1	1,5	13	---	58
1	9,5	254	193	61	255	199	56	1	1	9	70	65
2	10	220	193	27	240	199	41	1	1,5	13	40	54
3	10	---	---	---	245	199	46	1	1,5	13	---	59
1	16,5	---	---	---	254	200	54	1	1,5	13	---	67
2	17	247	195	52	248	201	47	1	2,5	20	72	67
3	18	252	194	58	250	200	50	1	1,5	14	72	64
СРФ 3, сітка №008 (іспити в день монтажу)												
1	6	230	192	38	232	197	35	1	3,5	18	56	53
2		236	192	44	237	198	39	1	4	23	67	62
3		228	192	36	232	198	34	1	4	23	59	57
1	10	239	164	75	237	200	37	1	4	23	98	60
2	10,5	229	192	37	234	198	36	1	3	14	51	50
3	11	237	192	45	237	198	39	1	3	14	59	53
1	14	232	192	40	245	198	47	1	2	7	47	54
2		236	192	44	233	198	35	1	3	14	58	49
3		234	193	41	233	199	34	1	3	14	55	48
СРФ 3, сітка №008 (іспити після 7 тижнів витримки у КП)												
1	8	---	---	---	235	199	36	1	4	22	---	58
2		235	193	42	246	199	47	1	3,5	19	61	66
3		---	---	---	237	201	36	1	5	29	---	65
1	11	---	---	---	235	200	35	1	4	23	---	58
2	12	230	192	38	245	198	47	1	2	7	45	54
3		234	193	41	243	199	44	1	3	14	55	58
1	16	233	195	38	242	201	41	1	4	23	61	64
2	16,5	236	195	41	240	201	39	1	4	23	64	62
3		236	195	41	243	201	42	1	4	23	64	65

Результати визначення КУЗ СРФ з комплекту зразків №15 (термін перебування в рідкій фазі і під парами НДМГ – 23 роки)

№ іспиту	Температура, °С	Показники п'єзометрів, мм						Висота газового об'єму під сіткою, мм			КУЗ, мм ст. роб. рід.	
		Одиночний прорив			Масовий прорив			$P_{злив.}$, кгс/см ²	Δh_p , мм	h_2 , мм	одиночний прорив	масовий прорив
		під сіткою	над сіткою	різниця	під сіткою	над сіткою	різниця					
СРФ 1, сітка №008 (іспити в день монтажу)												
1	5	127	35	92	147	57	90	1	2	18	110	108
2	4	138	35	103	155	57	98	1	1,5	14	117	112
3		---	---	---	145	58	87	1	1,5	14	---	101
1	10	---	---	---	150	60	90	1	1	10	---	100
2		159	38	121	153	60	93	1	1	10	131	103
3		156	38	118	154	60	94	1	2	18	136	112
1	15	165	39	126	153	61	92	1	1	10	136	102
2	15,5	150	41	109	156	63	93	1	1,5	14	123	107
3		157	41	116	159	63	96	1	1	10	126	106
СРФ 1, сітка №008 (іспити після 7 тижнів витримки у КП)												
1	10	159	37	122	155	63	92	1	1	10	132	102
2		164	37	127	163	63	100	1	1	10	137	110
3		155	37	118	150	63	87	1	1	10	128	97
СРФ 2, сітка №008 (іспити в день монтажу)												
1	6	160	59	101	155	65	90	1	1,5	14	115	104
2	7	160	59	101	150	65	85	1	1	10	111	95
3	10	155	63	92	150	69	81	1	2	18	110	99
1	11	156	63	93	153	69	84	1	2	18	111	102
2		156	62	94	150	68	82	1	2	18	112	100
1	15	160	65	95	152	71	81	1	2	18	113	99
2		150	65	85	150	71	79	1	2	18	103	97
3		155	64	91	150	70	80	1	1,5	14	105	94
СРФ 2, сітка №008 (іспити після 7 тижнів витримки у КП)												
1	4	156	59	97	157	59	98	1	1,5	14	111	112
2	5	155	59	96	154	59	95	1	1	10	106	105
3		157	59	98	154	59	95	1	1	10	108	105
1	9,5	152	60	92	153	60	93	1	1	10	102	103
2		159	60	99	156	60	96	1	1	10	109	106
3		157	60	97	155	60	95	1	1	10	107	105

1	15	150	64	86	151	64	87	1	1,5	14	100	101
2		150	63	87	154	63	91	1	1,5	14	101	105
3		156	62	94	153	62	91	1	1	10	104	101
СРФ 3, сітка №008 (іспити в день монтажу)												
1	4	144	65	79	149	65	84	1	4	23	102	107
2		140	61	79	144	61	83	1	3	15	94	98
3		145	62	83	144	62	82	1	3,5	19	102	101
1	10	132	64	68	137	64	73	1	4	23	91	96
2		137	62	75	148	62	86	1	3	15	89	105
3		136	62	74	146	62	84	1	3	15	89	99
1	14	134	63	71	146	63	83	1	3	15	86	98
2		138	61	77	145	61	84	1	3	15	92	99
3		135	61	74	147	61	86	1	2	8	82	94
СРФ 3, сітка №008 (іспити після 7 тижнів витримки у КП)												
1	5	145	57	88	142	57	85	1	2	8	96	93
2		138	61	77	145	61	84	1	2	8	85	92
3		138	63	75	141	63	78	1	3	15	90	93
1	10	138	65	73	144	65	79	1	4	23	96	102
2		139	64	75	145	64	81	1	4	23	98	104
3		148	67	81	132	67	65	1	5	30	111	95
1	15	137	60	77	145	60	85	1	3	15	92	100
2		138	59	79	143	59	84	1	2,5	11	90	95
3		134	59	75	143	59	84	1	3	15	90	99

Таблиця 17

Результати визначення КУЗ СРФ з комплекту зразків №16 (термін перебування в рідкій фазі і під парами АТ – 31 рік і 1 місяць)

№ іспиту	Температура, °С	Показники п'єзометрів, мм						Висота газового об'єму під сіткою, мм			КУЗ, мм ст. роб. рід.	
		Одиночний прорив			Масовий прорив			$P_{злож}, \text{кгс/см}^2$	$\Delta h_p, \text{мм}$	$h_c, \text{мм}$	одиночний прорив	масовий прорив
		під сіткою	над сіткою	різниця	під сіткою	над сіткою	різниця					
СРФ 1, сітка №008 (іспити в день монтажу)												
1	5,5	230	190	40	240	180	60	0,04	1	7	47	67
2	6	234	195	39	250	195	55	0,06	1	7	46	62
3	6,5	220	192	28	250	192	58	0,1	1	7	35	65

1	8	235	189	46	240	189	51	0,05	1,5	11	57	62
2	9	200	192	8	242	192	50	0,07	2	16	24	66
3	9	235	192	43	250	192	58	0,04	1	7	50	65
1	14	240	190	50	235	190	45	0,1	2	16	66	61
2	14	240	190	50	248	190	58	0,12	2	16	66	74
3	14,5	235	190	45	240	190	50	0,13	2	16	61	66
СРФ 1, сітка №008 (іспити після 7 тижнів витримки у КП)												
1	6	240	180	60	250	180	70	0,14	1	7	67	77
2	7	240	190	50	248	192	56	0,14	1	7	57	63
3	7	244	192	52	250	192	58	0,13	1	7	59	65
1	12	228	190	38	238	190	48	0,02	1,5	11	49	59
2	12	230	190	40	240	190	50	0,08	1	7	47	57
3	12	236	190	46	252	190	62	0,06	1	7	53	69
1	15,5	240	192	48	246	192	54	0,16	1,5	12	60	66
2	16	239	192	47	244	192	52	0,06	1	8	55	60
3	16	239	191	48	244	192	52	0,12	1	7	55	59
СРФ 2, сітка №008 (іспити в день монтажу)												
1	7	---	---	---	235	205	30	0,14	7	38	---	68
2	7	---	---	---	224	195	29	0,04	4	26	---	55
3	7	---	---	---	224	189	35	0,06	3	22	---	57
1	10	---	---	---	242	202	40	0,1	3	22	---	62
2	10	---	---	---	250	198	52	0,12	3	23	---	75
3	11	---	---	---	245	192	53	0,1	2	16	---	69
1	16	---	---	---	238	195	43	0,15	3	23	---	66
2	16	---	---	---	230	195	35	0,1	2,5	19	---	54
3	16	---	---	---	232	193	39	0,14	2	17	---	56
СРФ 2, сітка №008 (іспити після 7 тижнів витримки у КП)												
1	10	240	192	48	230	195	35	0,05	3,5	24	72	59
2	10	---	---	---	235	195	40	0,14	3,5	25	---	65
3	10	235	195	40	235	195	40	0,1	3,5	25	65	65
1	4	250	195	55	244	195	49	0,07	2	16	71	65
2	4	---	---	---	240	195	45	0,11	2	16	---	61
3	6	---	---	---	245	195	50	0,12	2	16	---	66
1	14	---	---	---	250	197	53	0,2	1	8	---	61
2	15	237	195	42	247	195	52	0,2	1	8	50	60
3	15,5	---	---	---	235	196	39	0,24	2	18	---	57
СРФ 3, сітка №008 (іспити в день монтажу)												
1	6	---	---	---	235	195	40	0,16	3,5	21	---	61
2	6	---	---	---	240	190	50	0,1	4	23	---	73
3	6	---	---	---	240	195	45	0,08	3,5	18	---	63

1	10	---	---	---	240	190	50	0,1	3	14	---	64
2	11	235	195	40	240	195	45	0,06	3	13	53	58
3	12	240	195	45	230	190	40	0,01	4	20	65	60
1	15,5	---	---	---	240	200	40	0,21	4	27	---	67
2	16	237	197	40	240	197	43	0,28	3,5	25	65	68
3	16	---	---	---	240	200	40	0,25	3	19	---	59
СРФ 3, сітка №008 (іспити після 7 тижнів витримки у КП)												
1	11	240	198	42	244	197	47	0,05	4	21	63	68
2	12	240	196	44	242	197	45	0,09	3	14	58	59
3	12	240	194	46	235	194	41	0,16	3,5	21	67	62

Таблиця 18

Результати визначення КУЗ СРФ з комплексу зразків №16 (термін перебування в рідкій фазі і під парами НДМГ – 31 рік і 1 місяць)

№ іспиту	Температура, 0С	Показники п'єзометрів, мм						Висота газового об'єму під сіткою, мм		КУЗ, мм ст. роб. рід.	
		Одиночний прорив			Масовий прорив			Δh_p , мм	h_2 , мм	одиночний прорив	масовий прорив
		під сіткою	над сіткою	різниця	під сіткою	над сіткою	різниця				
СРФ 1, сітка №008 (іспити в день монтажу)											
1	7	120	37	83	105	37	68	1,5	14	83	82
2	7	114	37	77	115	37	78	1	9	77	87
3	7	113	39	74	108	39	69	3,5	25	74	94
1	11	114	42	72	105	42	63	4,5	28	72	91
2	11	120	40	80	105	40	65	3	22	80	87
3	11	115	45	70	96	45	51	6	33	70	84
1	15	112	43	69	110	43	67	4,5	28	69	95
2	16	119	42	77	119	42	77	3	22	77	99
3	17	117	40	77	90	40	50	2,5	20	77	70
СРФ 1, сітка №008 (іспити після 7 тижнів витримки у КП)											
1	5	110	35	75	100	37	63	3	22	75	85
2	5	---	35	---	105	35	70	1	9	---	79
3	5	120	35	85	114	35	79	1,5	13	85	92

СРФ 2, сітка №008 (іспити в день монтажу)											
1	6	130	40	90	115	40	75	4	27	90	102
2	6	112	39	73	115	39	76	4	27	73	103
3	6	---	---	---	115	36	79	3	22	---	101
1	12	115	40	75	115	40	75	2,5	20	75	95
2	12	120	38	82	113	38	75	2	17	82	92
3	12	110	38	72	120	38	82	2	17	72	99
1	15	100	40	60	105	44	61	4	27	60	88
2	15	120	41	79	115	40	75	2	17	79	92
3	15	120	42	78	115	42	73	3	22	78	95
СРФ 2, сітка №008 (іспити після 7 тижнів витримки у КП)											
1	4	60	0	60	78	0	78	2,5	20	60	98
2	4	76	0	76	83	0	83	2	17	76	100
3	4	74	0	74	85	0	85	2	17	74	102
СРФ 3, сітка №008 (іспити в день монтажу)											
1	4	70	0	70	65	0	65	3	14	84	79
2	4	70	0	70	70	0	70	3	14	84	84
3	4	72	0	72	70	0	70	2,5	10	82	80
1	12	69	3	66	70	3	67	3	14	80	81
2	12	76	4	72	73	5	68	3	14	86	82
3	12	69	2	67	68	3	65	3	14	81	79
1	15	70	5	65	75	5	70	3,5	18	83	88
2	15	73	4	69	72	4	68	2,5	10	79	78
3	15	69	4	65	66	4	62	3,5	18	83	80
СРФ 3, сітка №008 (іспити після 7 тижнів витримки у КП)											
1	5	70	3	67	72	3	69	3	14	67	83
2	5	68	3	65	70	3	67	3,5	18	65	85
3	5	70	5	65	70	5	65	4	22	65	87
1	10	70	5	65	68	5	63	3	14	65	77
2	10	70	5	65	67	5	62	3,5	18	65	80
3	10	70	3	67	67	5	62	4	22	67	84
1	15	64	7	57	64	7	57	3,5	18	57	75
2	15	70	4	66	60	6	54	4	22	66	76
3	15	68	5	63	65	5	60	3,5	18	63	78

ДОДАТОК Г

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ПО ТЕМІ ДИСЕРТАЦІЇ І
ВІДОМОСТІ ПРО АПРОБАЦІЮ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЇ

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати

Статті, опубліковані в періодичних виданнях, проіндексованих у базах Scopus та/або Web of Science або включених до категорії «А» Переліку наукових фахових видань України:

1. **Minai O.** Influence of long-term stays of elements of capillary intake devices in liquid propellant components on their parameters / O. Minai, O. Ivanov, I. Siedykh // Aerospace Research in Bulgaria. – Sofia, 2020. – Vol. 32. – P. 175-192. <https://doi.org/10.3897/arb.v32.e15> (Індексована *Web of Science*), [in English]. *Особистий внесок здобувача: теоретичне й експериментальне дослідження, обробка і аналіз результатів, визначення залежностей.*

2. **Minai O.** Choice of the optimum design of lateral PMD using the CFD method / O. Minai, I. Kuzmich // Aerospace Research in Bulgaria. – Sofia, 2023. – Vol. 35. – P. 128-144. <https://doi.org/10.3897/arb.v35.e13> (Індексована *Web of Science*), [in English]. *Особистий внесок здобувача: побудова 3D моделей, проведення розрахунків, обробка і аналіз результатів, визначення залежностей.*

3. **Мінай О.М.** Класифікація, основні типи конструкцій та призначення капілярних засобів забезпечення суцільності палива / О.М. Мінай // Космічна наука і технологія. – Київ, 2024. Т. 30, № 1 (146). – С. 14-30. <https://doi.org/10.15407/knit2024.01.014> (Індексована *Web of Science, SCOPUS*) [in Ukrainian].

Статті у наукових виданнях, включених до Переліку наукових фахових видань України:

4. **Минай А.Н.** Применение методов численного моделирования при экспериментальной отработке заборных устройств центрального типа / А.Н. Минай, И.В. Седых, И.Ю. Кузьмич // Авіаційно-космічна техніка і технологія. – Харків, 2019. – №6 (158). – С. 33-41. <https://doi.org/10.32620/aktt.2019.6.05> (Індексована *Google Scholar, Index*

Copernicus, CiteFactor), [in Russian]. *Особистий внесок здобувача: побудова 3D моделей, обробка і аналіз результатів, визначення залежностей*.

5. Седых И.В. Экспериментальное определение времени осаждения топлива в сферическом баке перед повторным включением маршевого двигателя / И.В. Седых, Д.С. Назаренко, **А.Н. Минай**, Я.О. Бабийчук // Системне проектування та аналіз характеристик аерокосмічної техніки: зб. наук. пр. – Дніпро, 2019. – Том XXVII. – С. 136-144. <https://doi.org/10.15421/471933> (Індексована *GoogleScholar*), [in Russian]. *Особистий внесок здобувача: експериментальне дослідження, обробка і аналіз результатів*.

6. Кузьміч І.Ю. Вибір оптимальної конструкції забірної пристрою у баку пального першого ступеню ракети-носія «Циклон-4» / І.Ю. Кузьміч, **О.М. Мінай** // Авіаційно-космічна техніка й технологія. – Харків, 2022. – №1 (177). – С. 25-33. <https://doi.org/10.32620/aktt.2022.1.03> (Індексована *Google Scholar, Index Copernicus, CiteFactor*), [in Ukrainian]. *Особистий внесок здобувача: проведення розрахунків, аналіз результатів, висновки*.

7. **Мінай О.М.** Зміна капілярної утримної здатності засобів забезпечення суцільності палива в наслідок їх тривалого терміну експлуатації / О.М. Мінай // Вісник ДНУ. Серія: ракетно-космічна техніка, зб. наук. пр. Дніпропетровського національного університету ім. Олеса Гончара. – Т XXXI – Дніпро, 2023. – С. 58-73. <https://doi.org/10.15421/452306> (Індексована *Google Scholar*), [in Ukrainian].

8. **Мінай О.М.** Експериментальне визначення зміни капілярної утримної здатності сітчастих розділювачів фаз / О.М. Мінай // Авіаційно-космічна техніка й технологія. – Харків, 2023. – № 6 (192). – С. 55-65. <https://doi.org/10.32620/aktt.2023.6.07> (Індексована *Google Scholar, Index Copernicus, CiteFactor*), [in Ukrainian].

9. **Мінай О.М.** Визначення швидкості корозії основного конструкційного матеріалу сіток капілярних розділювачів фаз / О.М. Мінай //

Авіаційно-космічна техніка й технологія. – Харків, 2024. – № 1 (193). – С. 43-55. <https://doi.org/10.32620/aktt.2024.1.04> (Індексована *Google Scholar*, *Index Copernicus*, *CiteFactor*), [in Ukrainian].

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

10. **Минай А.Н.** Применение методов численного моделирования при экспериментальной отработке заборных устройств баков ракет-носителей с центральным отбором компонентов топлива / А.Н. Минай, И.В. Седых, И.Ю. Кузьмич // Сучасні розрахунково-експериментальні методи визначення характеристик ракетно-космічної техніки: науково-практична конф. – Дніпро, 2019. – С. 29-30. *Особистий внесок здобувача: розробка 3D моделі, обробка і аналіз, висновки.*

11. Седых І.В. Визначення впливу числа Бонда на рух рідини при виконанні маневру переорієнтації за допомогою чисельного моделювання / І.В. Седых, **О.М. Мінай** // II Міжнародній науково-технічній конференції «Динаміка, міцність та моделювання в машинобудуванні» – Харків, 05 – 08 жовтня 2020 р. – С. 272-276. *Особистий внесок здобувача: літературний огляд та визначення основних залежностей.*

12. Siedykh I.V. Reorientation of fuel components to ensure restarting of the main engine: calculation methods, numerical simulation and experimental testing/ I.V. Siedykh, **О.М. Minai** // 71-st International Astronautical Congress, 12 – 14 October, 2020, London – Technical Presentation and Conference Paper IAC–20,A2,3,5. – 10 p. *Особистий внесок здобувача: літературний огляд та визначення основних залежностей.*

13. **Minai O.M.** Using mathematical modeling with experimental validation for the development of propellant continuity assurance equipment/ O.M. Minai // 72-st International Astronautical Congress, 25 – 29 October, 2021, Dubai – Technical Presentation and Conference Paper IAC – 21,A2,2,11. – 10 p.

14. **Мінай О.М.** Визначення динамічної складової гідравлічного залишку за допомогою методів чисельного моделювання / О.М. Мінай,

Р.М. Петренко // Людина і космос: зб. тез XXIV Міжнарод. молодіж. наук.-практ. конф., 25–27 квітня 2022 р. – Дніпропетровськ, 2022: збірник тез. – Дніпро, 2022. – С. 139. *Особистий внесок здобувача: літературний огляд, розробка математичної моделі, аналіз результатів, висновки.*

15. **Мінай О.М.** Застосування методів CFD моделювання при оптимізації конструкції забірних пристроїв у паливних баках ракет-носіїв / О.М. Мінай, І.Ю. Кузьміч // Авіація в XXI столітті: зб. тез X Всесвітній конгрес – «Безпека в авіації та космічні технології», 28 – 30 вересня 2022 р. – Київ, 2022: збірник тез. Київ, 2022. – С. 1-5. *Особистий внесок здобувача: літературний огляд, розробка математичної моделі, аналіз результатів, висновки.*

16. Смоленський Д.Е. Числове моделювання процесу зливу компонентів палива з баку / Смоленський Д.Е., **Мінай О.М.**, Гоман О.Г. // Комп'ютерна гідромеханіка: зб. тез VIII Міжнар. наук.-практич. конф., 27-28 вересня 2022 р. – Київ, 2022: збірник тез. Київ, 2022. – С. 78. *Особистий внесок здобувача: літературний огляд, розробка математичної моделі, аналіз результатів, висновки.*

17. **Мінай О.М.** Вплив на капілярну утримну здатність сітчастих роздільників фаз їх тривалого перебування у компонентах ракетного палива / О.М. Мінай, // Людина і космос: зб. тез XXV Міжнарод. молодіж. наук.-практ. конф., 12–14 квітня 2023 р. – Дніпропетровськ, 2023: збірник тез. – Дніпро, 2023. – С. 122-123.

18. **Minai O.M.** Prediction of performance of mesh phase separators in GEO satellite capillary intake devices / O.M. Minai // 74-st International Astronautical Congress, 02 – 06 October, 2023, Baku – Technical Presentation and Conference Paper IAC – 23,A2,4,4x76632 – 10 p.

19. **Мінай О.М.** Проблематика реализации космических проектов с применением криогенных двигательных установок многократного запуска / О.М. Мінай // Матеріали XVI наукових читань «Дніпровська орбіта – 2021» – Дніпро, 28 – 30 жовтня 2021 р. – С. 114-122.

20. Кузьміч І.Ю. Влияние диджитализации на процессы проектирования и экспериментальной отработки в ракетно-космической отрасли на примере капиллярного заборного устройства / І.Ю. Кузьміч, **О.М. Мінай** // Матеріали XVI наукових читань «Дніпровська орбіта – 2021» – Дніпро, 28 – 30 жовтня 2021 р. – С. 162-169. *Особистий внесок здобувача: літературний огляд, визначення залежностей, висновки.*

21. **Мінай О.М.** Швидкість корозійних процесів та їх вплив на зміну структурних і геометричних параметрів сітчастих розділювачів фаз / О.М. Мінай // Космічні горизонти: зб. тез 3-ї наук.-практ. інтер.-конф. Випуск №2, Дніпро, 2023. – С. 36-40.

Праці, які додатково відображають наукові результати дисертації (підтверджують практичне застосування матеріалів дисертації):

22. Исследование параметров сетчатых фазоразделителей после длительного пребывания в рабочих жидкостях. Днепр-ПСХ 35.21.18220.216 ОТ: техн. отчет. – Днепр: ГП «КБ «Южное». 2016. 53 с. *Особистий внесок здобувача: теоретичне й експериментальне дослідження, обробка і аналіз результатів, визначення залежностей.*

23. Разработка средств обеспечения сплошности, обеспечивающих многократный запуск ДУ на низкокипящих КТ в условиях орбитального полета. НТРП.216/174-2021 ОТ: техн. отчет. – Днепр: ГП «КБ «Южное». 2021. 76 с. *Особистий внесок здобувача: літературний огляд, побудова 3D моделей, обробка і аналіз результатів моделювання, проведення аналітичних розрахунків, визначення, висновки.*