

КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ

На правах рукопису

РУДЕНКО Олександр Ігорович

УДК 536.248.2:620.193.2: 669.14

ВПЛИВ ФІЗИКО-ХІМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ НА ТЕПЛОТЕХНІЧНІ
ХАРАКТЕРИСТИКИ ДВОФАЗНИХ ТЕРМОСИФОНІВ

05.14.05 - Теоретичні основи теплотехні ~~КК~~

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
дисертації на здобуття вченого ступеня
кандидата технічних наук

Київ - 1994



00755881 (Y)

AB 31.483

Робота виконана на кафедрі атомних електростанцій та інженерної теплофізики Київського політехнічного інституту.

Науковий керівник: доктор технічних наук,
професор Семена М.Г.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук,
професор Федоткін І.М.,

кандидат технічних наук,
ст.наук.співробітник
Волков С.С.

Ведуча організація: Інститут технічної теплофізики
НАН України

Захист дисертації відбудеться " 29 " грудня 1994 р.
о 17 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради
К 068.14.07 у Київському політехнічному інституті за адресою
252056, м.Київ, 5б, пр-т Перемоги, 37, корпус 5, аудиторія 406.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Київського полі-
технічного інституту.

Автореферат розісланий " 29 " листопада 1994 р.

Вчений секретар спеціалізованої
вченої ради

В.П.Рожалін

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Однією з основних задач розвитку сучасної теплообмінної техніки є підвищення одиничної потужності, економічності та якості продукції, що випускається при одночасному зниженні її габаритів і металоємкості. Успішне рішення цієї задачі неможливе без розробки та створення таких пристроїв як двофазні термосифони (ДТС). Маючи низький термічний опір та спроможність передавати великі теплові потоки, вони дозволяють по-новому реалізувати відвід теплової енергії, термостабілізацію, а в деяких випадках є єдиною можливістю для вирішення різноманітних інженерних задач. Використання ДТС із нержавіючої сталі з водою є найбільш доцільним і ефективним у якості елементів, що передають теплоту, різноманітного теплообмінного устаткування, що функціонує в агресивних середовищах.

Широке впровадження у виробництво ДТС з даним сполученням конструкційного матеріалу і теплоносія стримується із-за обмеженості відомостей про вплив фізико-хімічних процесів на теплотехнічні характеристики вказаних пристроїв в умовах їх тривалого функціонування, що ускладнює вирішення задач конструювання та розрахунку теплотехнічних характеристик ДТС і теплообмінних систем на їх базі для тривалої ефективною експлуатації.

Мета роботи. Метою дисертаційної роботи є дослідження впливу фізико-хімічних процесів на теплотехнічні характеристики ДТС із нержавіючої сталі з водою в умовах їх тривалого функціонування, створення методики розрахунку температурних полів ДТС для різного часу їх експлуатації та розробка способу захисту внутрішньої поверхні ДТС від дії корозійного процесу для збільшення їх ресурсу.

Методи дослідження. Для дослідження теплотехнічних характеристик ДТС в умовах їх тривалого функціонування використовувались тео-

ретичний та експериментальний методи. Вивчення якісного і кількісного складу продуктів корозії проводилось за допомогою їх мас-спектрометричного та хімічного дрібного аналізів. Швидкість корозії заліза у воді та її характер визначались ваговим методом та методом поляризаційного опору. Для визначення загальної кількості водню були використані теоретичний та аналітичний методи. З метою дослідження закономірностей дифузії водню крізь стінку ДТС застосовувався теоретичний метод. Обробка та узагальнення результатів усіх експериментів здійснювалось методами математичного аналізу за допомогою ПЕОМ.

Наукова новизна. Вперше проведено експериментальне дослідження впливу фізико-хімічних процесів на інтенсивність теплообміну у зонах нагріву і конденсації ДТС під час їх тривалого функціонування та представлені розрахункові залежності. Виявлено закономірності і показано вплив дифузії водню на зміну температурних полів ДТС в залежності від різних параметрів. Вивчено особливості газовиділення і вперше одержано узагальнюючі рівняння для розрахунку довжини пробки газу, що не конденсується (НКГ), та загальної кількості водню, що виділяється в ДТС. Розроблена методика визначення кількості водню, що залишається у внутрішній порожнині ДТС. Запропоновано модель корозійного процесу у закритій системі нержавіюча сталь-вода, а також вивчено вплив продуктів корозії на теплообмін у зонах нагріву та конденсації ДТС. Розроблений спосіб захисту внутрішньої поверхні ДТС із нержавіючої сталі з водою від корозії. На основі аналізу даних експериментальних досліджень створено методику розрахунку температурних полів ДТС для різних періодів часу їх функціонування.

Декларація особистого внеску. Особистим внеском дисертанта у розробку наукових результатів є всі положення, що виносяться на захист.

У дисертації захищаються:

1. Експериментальні дані про вплив фізико-хімічних процесів на теплотехнічні характеристики ДТС із нержавіючої сталі в водю, отримані в умовах їх довготривалого функціонування.

2. Виявлені закономірності та емпіричні залежності, що описують дифузію водню крізь стінку ДТС, а також експериментальні дані про її вплив на зміну температурних полів ДТС в залежності від часу їх функціонування, геометричних та режимних параметрів.

3. Модель корозійного процесу у закритій системі нержавіюча сталь-вода та експериментальні дані про характер впливу продуктів корозії на теплообмін у зонах нагріву та конденсації ДТС у часі.

4. Узагальнюючі залежності для визначення довжини пробки НКГ в залежності від часу функціонування, геометричних та режимних параметрів ДТС, а також результати експериментального і теоретичного визначення кількості водню, що залишається у внутрішній порожнині та загальної кількості водню, що виділяється в умовах довготривалої роботи ДТС.

5. Методика підготовки даних та розрахунку температурних полів ДТС для різних періодів часу їх функціонування.

Практичне значення. На основі проведених досліджень отримані нові дані про вплив фізико-хімічних процесів на теплотехнічні характеристики ДТС із нержавіючої сталі в водю в умовах їх тривалого функціонування, які дозволяють використовувати їх для розрахунку та конструювання як окремих термосифонів, так і теплообмінних систем на їх базі. Розроблений спосіб захисту внутрішньої поверхні ДТС від корозійного процесу і на підставі результатів проведених досліджень запропоновані способи прискорених ресурсних випробувань та вивчення сумісності матеріалів, що застосовуються для виготовлення ДТС.

Реалізація роботи. Результати роботи використані при розробці

та створенні теплових труб (ТТ) змінної провідності для систем терморегулювання у НВО "Прикладная механика" (м. Красноярськ), а також при розробці серійних теплообмінників-утилізаторів на експериментальному ливарно-механічному заводі (м. Борислав).

Апробація роботи. Матеріали дисертації доповідались: 1) на конференціях "Застосування теплових труб у народному господарстві", м. Київ, 1984 р. і "Ресурсозберігаюче обладнання на базі теплових труб", м. Київ, 1987 р.; 2) на конференції молодих вчених і фахівців в Інституті технічної теплофізики НАН України, м. Київ, 1986 р.; 3) на конференціях "Досвід експлуатації і шляхи удосконалення судового теплообмінного обладнання", м. Севастополь, 1987, 1988, 1991 р.р.; 4) на міжнародній конференції "Проблеми корозії та протикорозійного захисту конструкційних матеріалів. Корозія - 94", м. Львів, 1994 р.

Публікації. За матеріалами дисертації опубліковано 5 наукових статей та отримано 4 авторських свідоцтва.

Структура та обсяг роботи. Дисертація складається з вступу, п'яти глав, закінчення, списку літератури (67 найменувань) та додатків. Основний матеріал роботи викладено на 159 сторінках машинописного тексту, ілюстровано 46 малюнками та 6 таблицями.

ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертації, коротко перераховані існуючі результати по цьому питанню і основні положення, які автор виносить на захист.

У першій главі проведений літературний огляд робіт, присвячених вивченню можливості використання нержавіючої сталі і води в якості конструкційного матеріалу і теплоносія для ДТС, та відзначена перспективність цього сполучення.

Аналіз експериментальних і теоретичних досліджень у цій області показав, що основним процесом, значно впливаючим на теплотехнічні характеристики ДТС при їх довготривалій експлуатації є процес утворення НКГ - водню, що виділяється в результаті корозійної взаємодії матеріалу стінки з теплоносієм. Відзначено, що утворення твердих та газоподібних продуктів корозії носить нерівномірний характер і протікає, в основному, за електрохімічним механізмом. Розглянуті емпіричні і аналітичні залежності, запропоновані для визначення кількості водню, що залишається у внутрішньому об'ємі ДТС. Проте суперечні дані різних дослідників відносно параметрів, що присутні в цих залежностях, не дозволяють обґрунтовано рекомендувати чиюсь методику.

Відомі результати з питання дослідження впливу фізико-хімічних процесів на теплотехнічні характеристики ДТС в умовах їх тривалого функціонування обмежені вивченням зміни температури пари в залежності від часу функціонування і кількості НКГ, а також вимірюванням температурних полів і перепадів температури по всій довжині ДТС або у зоні конденсації. Експериментальні дані про вплив продуктів корозії на інтенсивність теплообміну у зонах нагріву і конденсації ДТС при їх довготривалому функціонуванні відсутні. Вкрай нечислені дані про зміну довжини пробки НКГ носять приватний характер і не дозволяють розрахувати ефективну довжину і площу внутрішньої, поверхньої зони конденсації, вільну від НКГ.

Експериментальні дані про вплив дифузії водню на характер зміни температурних полів ДТС в умовах їх тривалого функціонування нечислені. Відсутні рекомендації, що дозволяють визначити кількість водню, дифундуючого крізь стінку ДТС у процесі їх функціонування.

Розглянуті різні методи боротьби з виділенням НКГ. Але, позитивні результати вказаних методів мають обмежений характер, їх захисний механізм недостатньо вивчений, а самі методи в більшості ви-

падків - не технологічні.

На основі аналізу літературних даних по розглянутій проблемі були сформульовані мета і задачі дослідження.

У другій главі наведені принципові схеми установки і експериментальних камер, виготовлених для проведення випробувань ДТС, а також вивчення впливу фізико-хімічних процесів на їх теплотехнічні характеристики та розподіл температурних полів в умовах тривалого функціонування.

Підвід теплоти до зон нагріву вивчаємих ДТС і камер, виготовлених із нержавіючої сталі 12Х18Н10Т, здійснювався нагрівачами з ніхрому. Відвід теплоти від зон конденсації ДТС і камер здійснювався звичайною конвекцією. Температурні поля вимірювались мідь-константовими термопарами, привареними до стінки.

Досліджено 54 ДТС довжиною $3,5 \cdot 10^{-4}$ м, діаметром $1,2 \cdot 10^{-2}$ м і $2,0 \cdot 10^{-2}$ м з товщиною стінки $1 \cdot 10^{-3}$ м. Довжина зон нагріву і конденсації для усіх ДТС - $1 \cdot 10^{-4}$ м і $1,5 \cdot 10^{-4}$ м відповідно. Теплоносій - дистильована деаерована вода з рН 6,85 і концентрацією розчиненого кисню $C_{O_2} = 5 \cdot 10^{-8}$ кг/м³. Кількість заправленого теплоносія - 15 % від внутрішнього об'єму ДТС. Експерименти проведені у діапазоні зміни параметрів: 1) $q_n = (3,23 \dots 6,78) \cdot 10^5$ Вт/м²; 2) $P_{НАС} = (2,92 \dots 17,54) \cdot 10^5$ Па; 3) $\bar{t}_p = (134 \dots 204) \pm 2$ °С; 4) $\tau = 1 \dots 8635$ годин.

Дослідження корозійної поведінки нержавіючої сталі у воді в умовах функціонування ДТС проводились у спеціальних камерах. В кожній камері розташовувалось по два зразки з конструкційного матеріалу ДТС, які були корозійними датчиками. Досліди проводились у діапазоні зміни параметрів: 1) $t_p = 40 \dots 135$ °С; 2) $P_{НАС} = (1,01 \dots 3,15) \cdot 10^5$ Па; 3) $\tau = 1 \dots 1000$ годин. Теплоносій - дистильована деаерована вода з параметрами, відповідними воді, що використовувалась у ДТС.

Довірчий інтервал вимірювання температурних полів ДТС у експе-

риментах змінювався від $\pm 0,71$ до $\pm 0,75$ °C з довірчою імовірністю 0,94. Відносна похибка вимірювання перепаду температури по довжині ДТС знаходилась у діапазоні 3,6...17,5 %, довжини пробки НКГ - 5...26 %, коефіцієнтів тепловіддачі - 10...31 %. Аналіз НКГ і визначення кількості водню, що залишається у ДТС після різних періодів часу їх функціонування, здійснювався мас-спектрометричним способом, відносна похибка вимірювань якого не перевищувала ± 10 %.

У третій главі викладені результати дослідження корозійного процесу у ДТС із нержавіючої сталі з водою в умовах їх тривалого функціонування. Зроблено аналіз впливу різних факторів, впливаючих на проходження корозійного процесу як у відкритих, так і закритих системах з метою створення теоретичної моделі корозійного процесу, протікаючого у ДТС. Показано, що основним кородуючим елементом у ДТС є залізо, на яке приходиться ≈ 70 % складу нержавіючої сталі.

Відповідно з теоретичними даними М.П. Жука процес електрохімічної корозії є термодинамічно можливим, якщо виконуються умови:

$$r E_{Me^{z+}/Me} < r E_{OH^-/O_2} \quad (1)$$

$$r E_{Me^{z+}/Me} < r E_{H^+/H_2} \quad (2)$$

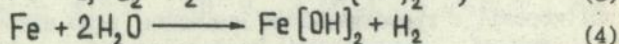
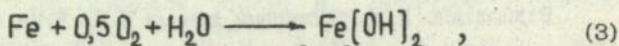
де $r E_{Me^{z+}/Me}$, $r E_{OH^-/O_2}$, $r E_{H^+/H_2}$ - рівноважні потенціали металу, кисневого та водневого електродів, В.

Розрахунки по зазначеній методиці (1), (2) з використанням результатів, одержаних у дисертаційній роботі показали (табл.), що у діапазоні температур 20...210 °C і рН 6,85 вже з самого початку функціонування ДТС має місце процес електрохімічної корозії з кисневою (3) та водневою (4) деполяризаціями.

Таблиця

Рівноважні електродні потенціали заліза (Fe^{2+}),
кисневого та водневого електродів.

Робоча температура, °C	$E_{\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}}, \text{В}$ [$a_{\text{Fe}^{2+}} = 1 \cdot 10^{-6}$]	$E_{\text{OH}^-/\text{O}_2}, \text{В}$ [$p_{\text{O}_2} = 0,195 \text{ Па}$]	$E_{\text{H}^+/\text{H}_2}, \text{В}$ [$p_{\text{H}_2} = 4,66 \cdot 10^{-7} \text{ Па}$]
20	-0,614	0,806	-0,214
134	-0,682	0,964	-0,298
154	-0,694	0,992	-0,312
184	-0,712	1,033	-0,334
204	-0,724	1,061	-0,349



Проведені дослідження показали, що з часом, по мірі зменшення концентрації розчиненого кисню в теплоносії, швидкість процесу (3) поступово зменшується, наближаючись до нуля, що підтверджується відсутністю кисню на спектрах НКГ вже після ~ 100 годин безперервного функціонування ДТС в усьому дослідженому діапазоні робочих температур. У той же час процес (4) має безперервний характер, тому що $E_{\text{H}^+/\text{H}_2}$ буде завжди позитивніше, ніж $E_{\text{Me}^{2+}/\text{Me}}$. Внаслідок цього реакція (4) поступово стає домінуючою для всього корозійного процесу.

Доведено, що корозійний процес у закритій системі має складний характер і залежить від ряду факторів ($t, \tau, \text{pH}, c_{\text{O}_2}$ та інш.), зміна яких приводить до того, що утворення продуктів корозії відбувається з різною інтенсивністю у часі, тобто нерівномірно. У початковий період функціонування ДТС відзначено більш інтенсивне газовиділення,

що обумовлено низьким значенням рН теплоносія та відсутністю гальмуючого впливу поки ще невеликої кількості продуктів корозії. Подальше підвищення рН теплоносія і нагромадження продуктів реакцій сприяє сповільненню корозії та зниженню швидкості виділення водню. Багатокомпонентність нержавіючої сталі сприяє тому, що на її поверхні можуть частково відбуватись і процеси хімічної корозії, що супроводжуються утворенням комплексних сполучень на основі Ni-Cr-Fe, які мають кристалеву решітку типу "шпінель".

Дослідження закономірностей корозійного процесу у закритій системі методом поляризаційного опору також підтвердили, що процес корозії у ДТС відбувається безперервно, але нерівномірно. У початковий період функціонування ДТС спостерігається більш висока швидкість корозії з інтенсивним виділенням водню, але у послідуєчому, через визначені проміжки часу в залежності від робочої температури, швидкість процесу знижується внаслідок зміни корозійних властивостей системи нержавіюча сталь-вода.

Аналіз даних якісного складу утвореного НКГ і хімічного аналізу відпрацьованого теплоносія показав, що в усіх досліджених ДТС основним газоподібним компонентом пробки є водень, а основним кородуючим елементом нержавіючої сталі - залізо, які виділяються в результаті корозійного процесу.

Отже, експериментально доведено, що описана модель задовільно відтворює корозійний процес у ДТС із нержавіючої сталі з водою в процесі їх довготривалого функціонування.

На підставі аналізу досліджень корозійного процесу в ДТС зроблено висновок, що найбільш прийнятним методом захисту внутрішньої поверхні ДТС від корозійного впливу теплоносія є утворення на ній рівномірного, міцно зчепленого з цією поверхнею шару, що перешкоджає прямому контакту основного металу корпусу з водою. Для цього був роз-

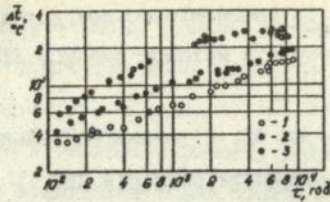
роблений спосіб захисту внутрішньої поверхні ДТС із нержавіючої сталі в воду, що полягає у створенні на ній суцільної окисної плівки, яка має високу адгезію з металевою основою в результаті термічної обробки при визначених температурно-часових режимах (а.с. СССР N 1392120).

Результати експериментального дослідження впливу методу захисту внутрішньої поверхні від корозії на теплотехнічні характеристики ДТС при їх тривалому функціонуванні показали (мал.1), що перепад температури між крайніми перерізами зон нагріву і конденсації в ДТС, поверхня яких захищена за розробленим методом, значно менше, ніж у ДТС без захисту поверхні і захищених за методикою В. К. Глазунової та інш. При цьому і кількість водню, що виділився в ДТС після річних випробувань більш як у 2,1 і 1,6 разів менше, ніж у ДТС без захисту поверхні та захищених за методикою В.К. Глазунової та інш.

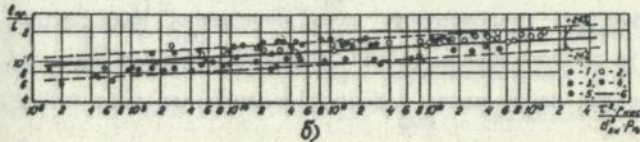
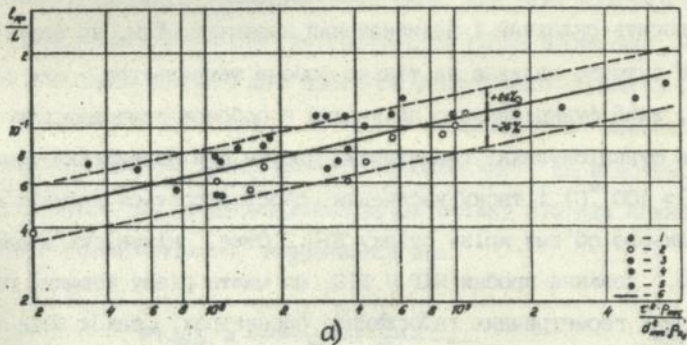
У четвертій главі наведені експериментальні дані дослідження процесів газовиділення в ДТС.

В результаті аналізу даних проведених досліджень виявлено, що в початковий період часу функціонування ДТС має місце різке збільшення довжин пробок НКГ внаслідок посиленого виділення водню, яке потім сповільнювалось. Але на протязі всього періоду випробувань не було відмічено стабілізації розмірів пробки, що пояснюється незагасаючим характером виділення водню і знаходиться у відповідності з наведеною моделлю корозійного процесу.

На підставі отриманих результатів зроблено висновок, що кожній робочій температурі, незалежно від геометричних розмірів і, отже, площі поверхні, що кородує, відповідає визначений період часу τ_0 , що характеризується більш інтенсивним газовиділенням і, відповідно, більш інтенсивним збільшенням пробки НКГ. До того ж, при меншій робочій температурі τ_0 збільшується, а при більшій - зменшується, що



Мал.1. Зміна середнього перепаду температури вздовж ДТС від часу функціонування: 1 - метод захисту автора; 2 - метод захисту В.К. Глазунової; 3 - без захисту внутрішньої поверхні.



Мал.2. Узагальнення експериментальних даних по зміні довжини пробки НКГ у початковий (а) та тривалий (б) періоди часу функціонування ДТС: 1 - $\bar{t}_p = 134 \pm 2^\circ\text{C}$, $d_{\text{вн}} = 1 \cdot 10^{-2}$ м; 2 - $\bar{t}_p = 154 \pm 2^\circ\text{C}$, $d_{\text{вн}} = 1 \cdot 10^{-2}$ м; 3 - $\bar{t}_p = 154 \pm 2^\circ\text{C}$, $d_{\text{вн}} = 1,8 \cdot 10^{-2}$ м; 4 - $\bar{t}_p = 184 \pm 2^\circ\text{C}$, $d_{\text{вн}} = 1 \cdot 10^{-2}$ м; 5 - $\bar{t}_p = 204 \pm 2^\circ\text{C}$, $d_{\text{вн}} = 1 \cdot 10^{-2}$ м; 6 - узагальнення рівняннями (6) та (7) відповідно.

знаходиться у відповідності із закономірностями впливу температури на швидкість корозійного процесу між металом корпусу ДТС та теплоносієм.

Отримані дані показують, що τ_0 є функцією тільки робочої температури, не залежить від геометричних розмірів ДТС і визначається із рівняння

$$\tau_0 = 1,44 \cdot 10^{12} \cdot \bar{t}_p^{-4,63} \quad (5)$$

Аналіз факторів, що впливають на зміну довжини пробки НКГ показав, що її розмір є функцією багатьох змінних величин, залежність від яких носить складний і невизначений характер. Так, на формування пробки НКГ суттєво впливає не тільки робоча температура, але і тиск насичення, який функціонально зв'язаний з робочою температурою. Крім цього, при функціонуванні герметичних систем при підвищених температурах ($t > 100$ °C) і тиску насичення спостерігається дифузія водню із внутрішнього об'єму крізь стінку ДТС. Отже, кількість водню і, відповідно, довжина пробки НКГ у ДТС, що мають різну товщину стінки при однакових геометричних та режимних параметрах, також може бути різною.

В результаті узагальнення дослідних даних про зміну довжин пробок НКГ із застосуванням теорії розмірностей були отримані наступні рівняння для початкового і довготривалого періодів функціонування ДТС

$$l_{np} = 1,39 \cdot 10^{-3} \left[\frac{\tau^2 \cdot P_{нас}}{d_{вн}^2 \cdot \rho_{H_2}} \right]^{0,24} \cdot L, \quad \tau \leq \tau_0 \quad (6)$$

$$l_{np} = 2,9 \cdot 10^{-2} \left[\frac{\tau^2 \cdot P_{нас}}{d_{вн}^2 \cdot \rho_{H_2}} \right]^{0,06} \cdot L, \quad \tau > \tau_0 \quad (7)$$

Представлені залежності, що узагальнюють 85% дослідних точок,

вадовільно описують зміну довжини пробки НКГ у ДТС для початкового (мал.2,а) та довготривалого (мал.2,б) періодів їх функціонування з похибкою $\pm 26\%$.

Розрахунок загальної кількості водню, що виділяється при функціонуванні ДТС відбувався в два етапи: 1) визначення кількості водню, що дифундує із ДТС; 2) розрахунок кількості водню, що залишається в ДТС.

Завдання визначення кількості водню, що дифундує крізь стінку ДТС, формувалась з такими припущеннями: дифузія водню відбувається крізь залізну стінку; температура і тиск, при яких відбувається дифузія, дорівнюють середній температурі та тиску насичення у внутрішньому об'ємі кожного ДТС протягом усього експерименту; дифузія водню відбувається на ділянці з його максимальною концентрацією, тобто крізь поверхню ДТС, зайняту пробкою НКГ. На підставі цього, кількість водню, що продифундувала крізь стінку ДТС для кожного періоду часу функціонування, визначалась як:

$$m_{\text{диф}} = \frac{q_{\text{диф}} \cdot F_{\text{диф}} \cdot \tau}{R_{\text{H}_2} \cdot T_p} \quad (8)$$

Тут $q_{\text{диф}} = \frac{k_0}{\delta_{\text{ст}}} \cdot \sqrt{P_{\text{нас}}} \cdot e^{-\frac{b_0}{T_p}}$ - швидкість дифузії водню в урахуванням коефіцієнтів k_0 та b_0 , характеризуючих фізико-хімічні властивості системи залізо-водень; $F_{\text{диф}}$ - площа внутрішньої поверхні, зайнята пробкою НКГ, що визначається на підставі розрахунку середньої інтегральної довжини пробки в кожний період часу функціонування ДТС.

Визначення кількості водню, що залишається у внутрішньому об'ємі, проводилось з урахуванням наступних умов: весь НКГ знаходиться у пробці; між паром і газом існує помітний кордон розподілу - парогазовий фронт (ПГФ), що має форму параболи; теплофізичні властивості

теплоносія визначались по температурі насичення при робочому парціальному тиску пари; втрати тиску в паровому каналі малі; НКГ підпорядковується рівнянню стану ідеального газу.

Розрахунок кількості водню, що залишається в ДТС, зводився до:

1) знаходження об'єму, зайнятого пробкою НКГ по формулі

$$V_{\text{пр.}} = V_{\text{цил.}} - V_{\text{ПГФ}} = \frac{\pi \cdot d^2 \cdot \text{вн.}}{4} \cdot [L_k - \tilde{X}^*] - \pi \int_0^{\tilde{X}_0 - \tilde{X}^*} y^2 dx, \quad (9)$$

де \tilde{X}^* , \tilde{X}_0 - координати початку зворотних течій на стінці та вершини ПГФ відповідно, що визначаються з використанням рішення О.А. Парфентьевої та експериментальних даних про довжину пробки НКГ (6), (7); $y^2 = \frac{\tilde{x}}{a}$ - рівняння параболи; 2) розрахунку маси водню із рівняння газового стану. При цьому враховувалась наявність у пробці НКГ водяної пари та залишкового азоту.

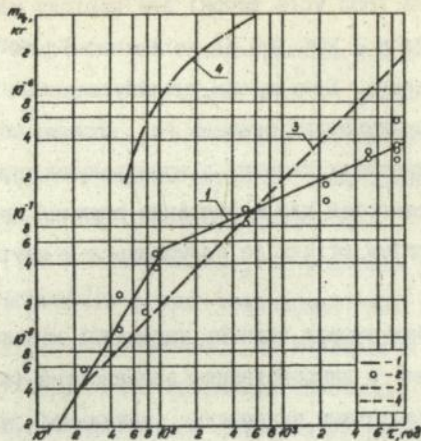
На мал.3 зображені результати досліджень, отримані розрахунковим та експериментальним методами. Приведені дані підтверджують нерівномірність виділення водню в часі внаслідок складного характеру процесу корозії. Для порівняння також показані результати розрахунку по методикам І.Г. Шекріладзе та В.М. Бородкіна, які не враховують нерівномірність виділення водню в процесі функціонування ДТС. Очевидно, що кількість водню в ДТС, поверхня яких захищалась по розробленій методиці, значно менша порівняно з ДТС, де поверхня не була захищена.

В результаті обробки експериментальних даних по визначенню загальної кількості водню, що виділяється при функціонуванні ДТС, були отримані наступні рівняння:

$$m_0 = 8,44 \cdot 10^{-20} \cdot \tau^{4,5} \cdot \bar{t}_p^{5,2} \cdot S, \quad \tau \leq \tau_0 \quad (10)$$

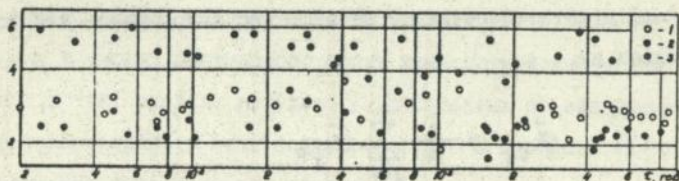
$$m_0 = 4,92 \cdot 10^{-19} \cdot \tau^{4,1} \cdot \bar{t}_p^{5,2} \cdot S, \quad \tau > \tau_0 \quad (11)$$

Отримані дані задовільно узагальнюються наведеними залежностями



Мал.3. Залежність кількості водню, що залишається у внутрішньому об'ємі ДТС ($\bar{t}_p = 154 \pm 2^\circ \text{C}$, $d_{\text{вн}} = 1 \cdot 10^{-2} \text{ м}$, $L = 0,34 \text{ м}$) від часу функціонування: 1,2 - розрахунок та експериментальні дані автора; 3 - розрахунок за методикою І.Г. Шекріладзе; 4 - розрахунок за методикою В.М. Бородкіна.

$\bar{q}_n \cdot 10^3 \text{ Вт/м}^2$



Мал.4. Вплив корозійного процесу на теплообмін у зоні нагріву ДТС під час їх тривалого функціонування: 1 - $\bar{q}_n = 3,65 \cdot 10^3 \text{ Вт/м}^2$, $d_{\text{вн}} = 1 \cdot 10^{-2} \text{ м}$; 2 - $\bar{q}_n = 3,68 \cdot 10^3 \text{ Вт/м}^2$, $d_{\text{вн}} = 1,8 \cdot 10^{-2} \text{ м}$; 3 - $\bar{q}_n = 6,78 \cdot 10^3 \text{ Вт/м}^2$, $d_{\text{вн}} = 1 \cdot 10^{-2} \text{ м}$.

тими з похибкою $\pm 38\%$ (85% усіх точок) для періоду початкового функціонування і з похибкою $\pm 20\%$ (88,5% усіх точок) для періоду довготривалого функціонування. Результати аналізу похибок визначення експериментальних і розрахункових значень m_0 цілком обґрунтовують отриману розбіжність вказаних величин з врахуванням прийнятих припущень при виводі залежностей для визначення довжини пробки НКГ, маси водню, що дифундує крізь стінку та залишається у внутрішній порожнині ДТС.

Порівняння розрахункових значень загальної кількості водню, що виділяється, отриманих з використанням залежностей (10), (11), з експериментальними результатами визначення загальної кількості водню хімічними методами, показали задовільну відповідність між собою.

У п'ятій главі наведені результати експериментального дослідження впливу фізико-хімічних процесів на теплотехнічні характеристики ДТС при їх тривалому функціонуванні.

Аналіз отриманих результатів показав, що протягом усього тривалого періоду функціонування ДТС, величина коефіцієнтів тепловіддачі у зоні нагріву кожного ДТС залишалась практично незмінною внаслідок малої товщини шару відкладів твердих продуктів корозії (мал.4). Тому середній коефіцієнт тепловіддачі за весь час випробувань для кожного ДТС визначався як

$$\bar{\alpha}_{iH} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \bar{\alpha}_{jH} \quad (12)$$

де $\bar{\alpha}_{jH}$ - величина коефіцієнта тепловіддачі в кожний момент часу;
 n - кількість вимірювань.

Отримані результати експериментальних досліджень у зоні нагріву узагальнювались за методикою, запропонованою М.К. Безродним:

$$\frac{\bar{\alpha}_{iH}}{\bar{\alpha}_{в.о.}} = f \left[\frac{P_{iH, наг.}}{P_{кр.}} \right] \quad (13)$$

Задовільна відповідність експериментальних даних, отриманих у процесі довготривалого функціонування ДТС з розрахунковою залежністю (13), показує, що вказана методика для визначення інтенсивності теплообміну справедлива і для розрахунку коефіцієнтів тепловіддачі в зоні нагріву ДТС при їх тривалій експлуатації.

Результати дослідження впливу газоподібних продуктів корозійного процесу на теплообмін у зоні конденсації ДТС в процесі їх довготривалого функціонування показали, що незважаючи на дифузю частини водню крізь стінку, спостерігалось поступове збільшення розмірів пробки НКГ, що супроводжувалось скороченням довжини зони конденсації та підвищенням температури насичення. Тому при обробці експериментальних даних по теплообміну в зоні конденсації ДТС були зроблені наступні припущення: конденсація відбувається тільки на поверхні, вільної від НКГ, тобто $L_{акт} = L_k - l_{пр}$; температура насичення змінювалась незначно, всі фізичні параметри визначались по її середньому значенню; зміна перепаду температури в активній частині зони конденсації $\Delta t = t_{нас.} - \bar{t}_{ст.к}$ в часі приймалася постійною внаслідок незначного збільшення товщини плівки стікаючого конденсату через компенсуючий вплив зниження в'язкості рідини і підвищення її швидкості руху в умовах поступового росту температури насичення.

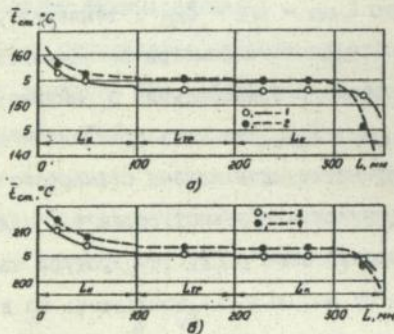
На підставі аналізу результатів досліджень по визначенню коефіцієнтів тепловіддачі у зоні конденсації ДТС в процесі їх тривалого функціонування було отримано рівняння:

$$\bar{\alpha}_k = 0,943 \sqrt[4]{\frac{\lambda_p^3 \cdot g_p^2 \cdot g \cdot r}{m_p \cdot \Delta t \cdot [L_k - l_{пр}]}} \quad (14)$$

Отримані дані (мал.5) показують, що спостерігається задовільна відповідність між експериментальними результатами та формулою, що дозволяє вираховувати поступову зміну ефективної довжини зони кон-



Мал.5. Вплив корозійного процесу на теплообмін у зоні конденсації ДТС: а) $\circ - \bar{Q} = 10,83$ Вт, $d_{BH} = 1 \cdot 10^{-2}$ м; б) $+ - \bar{Q} = 21,35$ Вт, $d_{BH} = 1 \cdot 10^{-2}$ м; 1,2 - узагальнення рівнянням (14); 3 - теоретична залежність Нуссельта.



Мал.6. Зміна температурних полів ДТС на протязі різних періодів часу їх функціонування: а) $\bar{t}_p = 154 \pm 2$ °С, $d_{BH} = 1 \cdot 10^{-2}$ м, 1 - $\tau = 105$ годин, 2 - $\tau = 4417$ годин; б) $\bar{t}_p = 204 \pm 2$ °С, $d_{BH} = 1 \cdot 10^{-2}$ м, 3 - $\tau = 118$ годин, 4 - $\tau = 4432$ годин.

денсації. Тут же для порівняння отриманих експериментальних даних наведено також рішення Нуссельта. Очевидно (мал.5,а), що у початковий період функціонування ДТС, коли кількість НКГ мала, ППФ не стабілізований і пробка тільки починає формуватись, її розміри мають значно менший вплив на ефективну довжину i , відповідно, площу зони конденсації, ніж у довготривалий період, а експериментальні дані мають більш низькі значення і наближаються до відомого рішення Нуссельта. В процесі подальшого функціонування ДТС, по мірі накопичення НКГ і збільшення довжини пробки, зменшення активної довжини зони конденсації має більш динамічний характер, що супроводжується підвищенням температури насичення і інтенсифікацією теплообміну. Підвищення рівня робочої температури та тиску насичення приводять до стиснення пробки НКГ і збільшення довжини активної частини зони конденсації, внаслідок чого експериментальні дані (мал. 5, б) наближаються до рішення Нуссельта.

Вивчення впливу дифузії водню на температурний стан ДТС в процесі їх тривалого функціонування показало, що дифузійний процес справляє суттєвий вплив на розподіл температурних полів ДТС і, відповідно, на їх теплотехнічні характеристики. Це пов'язано з тим, що в залежності від часу функціонування, геометричних та режимних параметрів в результаті дифузії частини водню крізь стінку ДТС, кількість водню, що залишається у внутрішньому об'ємі ДТС та в пробці НКГ, змінюється, що приводить до зміни закономірностей теплообміну та розподілу температурних полів як у пробці НКГ, так і у зоні конденсації.

За допомогою розрахункового (8) та експериментального методів доведено, що з підвищенням робочої температури і тиску насичення при однакових значеннях товщини стінки ДТС, кількість водню, що дифундує з внутрішнього об'єму ДТС, збільшується, а кількість водню, що за-

лишається у ДТС - зменшується. Отримані дані (мал.6) також підтверджують, що підвищення температури та тиску насичення у ДТС сприяють збільшенню дифузії водню з внутрішньої порожнини ДТС і стисненню пробки НКГ, в результаті чого змінюється температура стінки у крайньому перерізі зони конденсації практично за рівні проміжки часу при $\bar{t}_p = 204 \pm 2^\circ\text{C}$ значно менша, ніж при $\bar{t}_p = 154 \pm 2^\circ\text{C}$. При цьому кількість водню, що залишається у внутрішньому об'ємі ДТС, при $\bar{t}_p = 204 \pm 2^\circ\text{C} \sim$ у два рази менше, ніж при $\bar{t}_p = 154 \pm 2^\circ\text{C}$.

Таким чином, теплотехнічні характеристики ДТС, що тривало працюють при більш високих температурах, вищі порівняно з ДТС, що працюють при більш низьких температурах, незважаючи на більш інтенсивне проходження корозійного процесу.

У додатку 1 наведено програму для розрахунку кількості НКГ, що залишається у ДТС після різних періодів часу їх функціонування.

У додатках 2,3 наведені методика підготовки даних для програми розрахунку температурних полів ДТС для різного часу їх функціонування, а також акти впровадження результатів дисертаційної роботи.

ВИСНОВКИ

1. Показана можливість та перспективність застосування ДТС із нержавіючої сталі з водою для забезпечення теплових режимів різного теплообмінного устаткування при дотриманні необхідних заходів антикорозійного захисту.

2. Розроблено спосіб захисту внутрішньої поверхні ДТС із нержавіючої сталі з водою від корозії (а.с. СССР N 1392120), доведена ефективність якого дає підставу рекомендувати його до використання.

3. Термодинамічно обґрунтована можливість протікання корозійного процесу з кисневою (1) та водневою (2) деполяризаціями у закритій системі нержавіюча сталь - вода і запропонована модель корозійного процесу в ДТС. Виявлена нерівномірність корозії в умовах

тривалого функціонування ДТС.

4. Доведено, що результати теоретичного прогнозу корозійного процесу задовільно узгоджуються з експериментальними даними газового, а також якісного хімічного аналізів теплоносіїв і твердих продуктів, що утворюються у ДТС.

5. Виконано теоретичний аналіз і отримано експериментальні дані про зміну розмірів пробок НКГ в початковий та довготривалий періоди функціонування ДТС. Отримано формули (6), (7) для визначення довжини пробки, що враховують час функціонування, теплофізичні властивості НКГ, а також геометричні та режимні параметри ДТС.

6. Отримано узагальнюючі залежності (10), (11) для розрахунку загальної кількості водню, знайдені на підставі аналізу даних експериментального дослідження якісного складу НКГ, а також теоретичних розрахунків кількості НКГ, що залишається у внутрішній порожнині та дифундує крізь стінку ДТС в процесі їх функціонування.

7. Показано вплив дифузії водню на розподіл температурних полів ДТС у процесі їх тривалого функціонування. Відзначено, що підвищення температури і, відповідно, тиску насичення сприяють збільшенню кількості газу, що дифундує крізь стінку ДТС, а також стисненню пробки НКГ, що супроводжується покращанням теплотехнічних характеристик ДТС, незважаючи на більш інтенсивне протікання корозійного процесу.

8. Встановлено, що корозійний процес у зоні нагріву ДТС не чинить суттєвого впливу на величину коефіцієнтів тепловіддачі у дослідженому температурно-часовому діапазоні, незважаючи на присутність твердих продуктів корозії. Коефіцієнти тепловіддачі в зоні нагріву ДТС при їх тривалому функціонуванні визначаються по формулі (13).

9. Визначено, що розрахунок теплосбіну в зоні конденсації ДТС у процесі їх тривалого функціонування можна здійснювати за допомогою модифікованої формули Нуссельта (14) з урахуванням зміни довжини ак-

тивної частини зони конденсації. Відхилення експериментальних точок від теоретичного рішення Нуссельта є наслідком неврахованого у теоретичному рішенні впливу довжини пробки НКГ, яка поступово скорочує активну довжину зони конденсації, що перешкоджає теплопередачі.

10. На підставі узагальнення даних комплексу проведених досліджень наведені методики інженерного розрахунку коефіцієнтів теплообміну в зонах нагріву і конденсації, а також підготовки даних для розрахунку температурних полів ДТС для різних періодів часу їх роботи. Отримані дані, надійність яких підтверджена багаточисельними експериментальними результатами протягом тривалого функціонування ДТС, дозволяють використовувати їх при розробці та конструюванні як окремих ДТС, так і різного устаткування на їх базі, що повинне працювати протягом тривалого періоду.

Зміст дисертації опубліковано в таких роботах:

1. Семена М.Г., Панасенко В.Ф., Руденко А.И. О механизме газовой выделении в тепловых трубах из нержавеющей стали с водой. - Изв. вузов. Энергетика, 1986, N7, с.79-82.

2. Семена М.Г., Руденко А.И., Ефимова А.А. Определение массы выделившегося водорода в тепловых трубах из нержавеющей стали с водой в процессе длительного функционирования. - Инженерно-физический журнал, 1987, т.53, N4, с.552-557.

3. Семена М.Г., Руденко А.И., Рыбкин Б.И., Гусев Ю.А. Определение интенсивности газовой выделении в тепловых трубах из нержавеющей стали с водой. - Изв. вузов. Энергетика, 1989, N2, с.82-86.

4. Руденко А.И., Панасенко В.Ф., Калабина Л.В., Семена М.Г. Механизм коррозии низкотемпературных тепловых труб из аустенитной нержавеющей стали с водой. - Изв. вузов. Энергетика, 1991, N2, с.92-97.

5. А.с. 1392120 (СССР). Способ термической обработки тепловой

трубы из аустенитной нержавеющей стали/ А.И. Руденко, А.П. Нищик, М.Г. Семена, О.А. Безуглый// Бюл. изобр., 1988, N16.

6. А.с. 1746180 (СССР). Способ ускоренных испытаний тепловой трубы/ А.И. Руденко, А.П. Нищик, А.Н. Гершуни// Бюл. изобр., 1992, N25.

7. А.с. 1772693 (СССР). Способ испытаний материалов/ А.И. Руденко, А.П. Нищик, В.Ф. Панасенко, Л.В. Қалабина// Бюл. изобр., 1992, N40.

8. А.с. 1786929 (СССР). Спецтема/ А.И. Руденко, А.П. Нищик, А.Н. Гершуни, М.Г. Семена.

9. Руденко А.И., Панасенко В.Ф., Калабина Л.В., Нищик А.П. Возможность оценки коррозионного поведения нержавеющей стали в воде по поляризационному сопротивлению в условиях функционирования тепловых труб. - Защита металлов, 1993, т.29, N5, с.768-772.

УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ

pH - водневий показник; ρ - густина теплового потоку, Вт/м²; t, T - температура, °С і К відповідно; L, l - довжина, м; P - тиск, Па, бар; d - діаметр, м; ρ - густина, кг/м³; δ - товщина, м; τ - час функціонування, год; R_{H_2} - газова стала, Дж/кг·К; V - об'єм, м³; S - площа кородуючої поверхні, м²; λ - коефіцієнт теплопровідності, Вт/м·К; g - прискорення вільного падіння, м/с²; g - прихована теплота пароутворення, кДж/кг; Q - тепловий потік, Вт; μ - коефіцієнт динамічної в'язкості, Па·с; v.o. - великий об'єм.

ІНДЕКСИ

нас - насичення; вн - внутрішній; ц - циліндр; р - робоча; кр - критичний; акт - активна; рід - рідина; ст - стінка; пр - пробка.

SUMMARY

Rudenko A.I. Influence physico-chemical processis on the heat engineering characteristics two phases thermosiphones.

Dissertation for the degree of candidate of technical science by speciality 05.14.05 - theoretical principles of heat engineering, Kiev polytechnic institute, Kiev, 1994.

The dissertation, in which maintain results of theoretical and experimental researches about influence physico-chemical processis on the heat engineering characteristics two phases thermosiphones of stainless steel with water in conditions of long-therm functions, is defended. It is shown expedience such devices for provide heat regimes in different equipment. It is realised industrial introduction of dissertation results.

АННОТАЦИЯ

Руденко А.И. Влияние физико-химических процессов на теплотехнические характеристики двухфазных термосифонов.

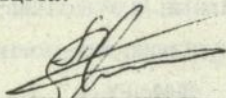
Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.05 - теоретические основы теплотехники, Киевский политехнический институт, Киев, 1994.

Защищается диссертация, которая содержит результаты теоретических и экспериментальных исследований о влиянии физико-химических процессов на теплотехнические характеристики двухфазных термосифонов из нержавеющей стали с водой при их длительном функционировании. Показана перспективность таких устройств для обеспечения тепловых режимов различного оборудования в течение длительного периода эксплуатации. Осуществлено промышленное внедрение результатов диссертации.

Ключові слова: теплотехнічні характеристики, двофазні термосифони, фізико-хімічні процеси.

Здобувач

О.И. Руденко



Подп. к печ. 22.11.94

Формат 60x84/16

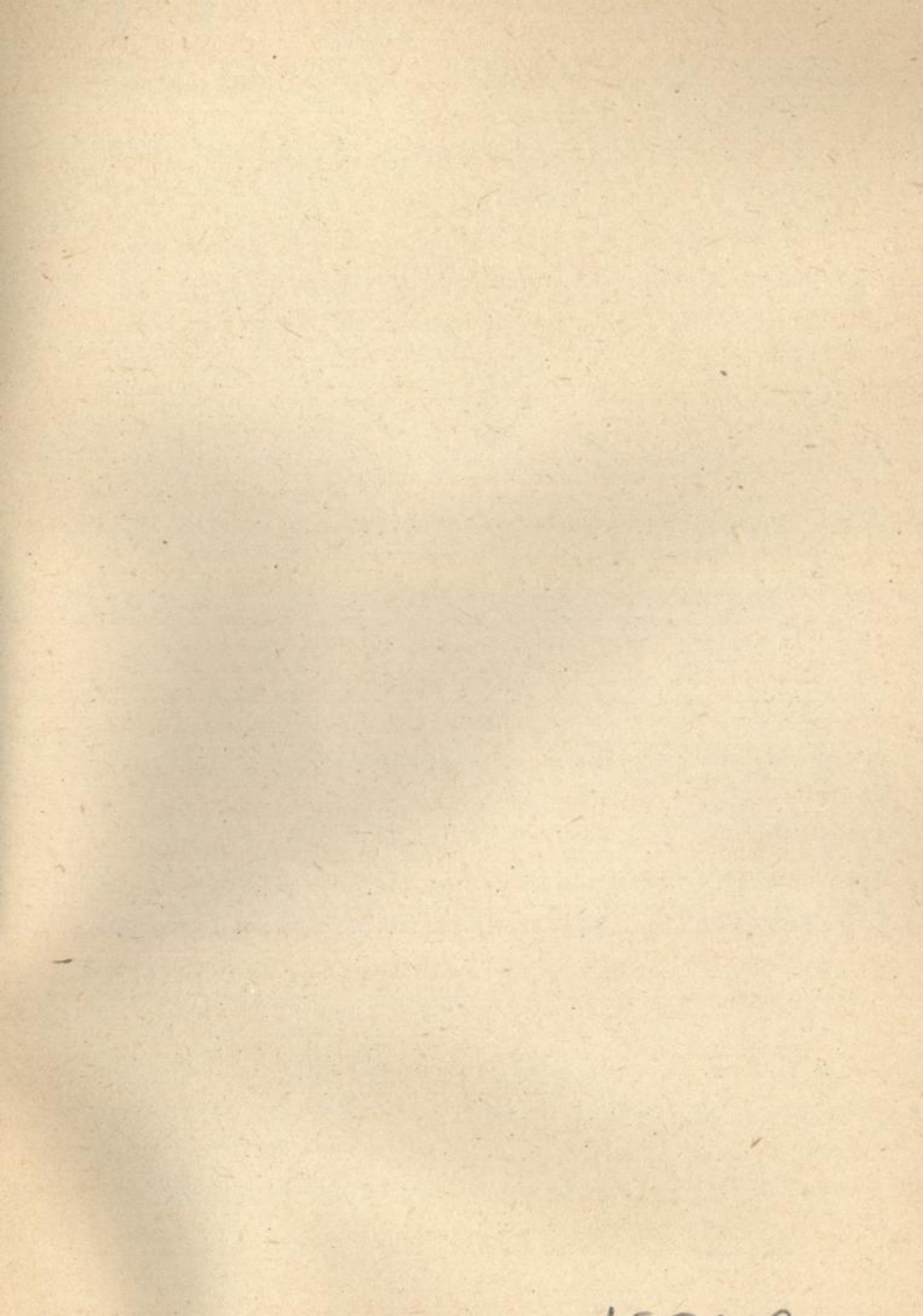
Бумага тип.

Печ. оф. Усл. печ. л. 1,3

Уч.-изд. л. 1

Тираж 100

Зак. 4-3951



AB 31.483

AB 31.483