

Danish scientific journal

DSJ



№37/2020

ISSN 3375-2389

Vol.1

The journal publishes materials on the most significant issues of our time. Articles sent for publication can be written in any language, as independent experts in different scientific and linguistic areas are involved.

The international scientific journal “Danish Scientific Journal” is focused on the international audience. Authors living in different countries have an opportunity to exchange knowledge and experience.

The main objective of the journal is the connection between science and society. Scientists in different areas of activity have an opportunity to publish their materials. Publishing a scientific article in the journal is your chance to contribute invaluable to the development of science.

Editor in chief – Lene Larsen, Københavns Universitet

Secretary – Sofie Atting

- Charlotte Casparsen – Syddansk Erhvervsakademi, Denmark
- Rasmus Jørgensen – University of Southern Denmark, Denmark
- Claus Jensen – Københavns Universitet, Denmark
- Benjamin Hove – Uddannelsescenter Holstebro, Denmark
- William Witten – Iowa State University, USA
- Samuel Taylor – Florida State University, USA
- Anie Ludwig – Universität Mannheim, Germany
- Javier Neziraj – Universidade da Coruña, Spain
- Andreas Bøhler – Harstad University College, Norway
- Line Haslum – Sodertorns University College, Sweden
- Daehoy Park – Chung Ang University, South Korea
- Mohit Gupta – University of Calcutta, India
- Vojtech Hanus – Polytechnic College in Jihlava, Czech Republic
- Agnieszka Wyszynska – Szczecin University, Poland

Also in the work of the editorial board are involved independent experts

1000 copies

Danish Scientific Journal (DSJ)

Istedgade 104 1650 København V Denmark

email: publishing@danish-journal.com

site: <http://www.danish-journal.com>

CONTENT

ARCHITECTURE

Chernykh O.

AREAS OF DISTRIBUTION OF SUMMER COTTAGE
SETTLEMENTS IN XVIII – XX CENTURY IN THE
TERRITORY OF THE PETERSBURG PROVINCE 3

MATHEMATICAL SCIENCES

Sharonin V.

ANALYSIS OF LINKS OF THE SECOND WORLD WAR 9

MEDICAL SCIENCES

**Hodzhaeva I., Nadzhimova Z.,
Umarov M., Rakhmatullaev F.**

INTENSIVE THERAPY OF SOME EMERGENT
CONDITIONS IN ACUTE INTESTINAL INFECTIONS IN
CHILDREN 11

Ganiev A., Abdurashidov A., Sanakulov A.

MODERN DIAGNOSTIC METHODS OF HYPERTENSION
IN TEENAGERS WITH ARTERIAL HYPERTENSION 13

Kurov V., Chestnyh E., Belyakov D., Peltzer A.

ASPECTS OF THE MORPHOLOGY ROOTS CANALS
DIFFERENT AGE PERIODS 16

Lysenkov S., Gelyus M., Tel L.

STRESS - LIMITING SYSTEM OF LUNGS UNDER
PHYSIOLOGICAL AND PATHOLOGICAL STRESS IN
HUMANS 22

Navchuk I., Navchuk G., Sobko D.

PREVENTIVE BASES FOR SOLVING THE PROBLEM OF
ARTERIAL HYPERTENSION BY REFORMING THE
HEALTH CARE SYSTEM IN RURAL AREAS 27

Navchuk I., Navchuk G., Sobko D.

SOCIO-MEDICAL FACTORS DETERIORATING THE
HEALTH OF THE RURAL POPULATION OF UKRAINE
DUE TO HYPERTENSION 29

**Fayzyrahmanova M., Yusupov U.,
Karimov A., Ishakova G., Tuhtabaev A.**

MICRODELETION ANALYSIS OF THE Y CHROMOSOME
AT THE AZF LOCUS IN MEN WITH IDIOPATHIC
INFERTILITY 32

PHYSICAL SCIENCES

**Otazhonov S., Alimov N.,
Movlonov P., Botirov K., Yunusov N.**

PHOTOSENSITIVITY CONTROL OF CdTe-SiO₂-Si-Al
HETEROSTRUCTURE WITH DEEP IMPURITY LEVELS
UNDER EXTERNAL FACTORS 35

Dzis V., Diachynska O.

EXPERIMENTAL STUDY OF THE VISCOSITY OF
RUBIDIUM AND CESIUM IN THE GAS PHASE 37

TECHNICAL SCIENCES

Dutchak M.

METHOD OF AUTOMATED CONSTRUCTION OF
LEARNING TRAJECTS IN INTELLIGENT ONLINE E-
LEARNING SYSTEMS 52

Saatova N.

METHOD FOR CALCULATING FLEXIBLE BENDING
ELEMENTS OF A FLIGHT STRUCTURE TAKING INTO
ACCOUNT THEIR ACTUAL CONDITION AT THE
MOMENT OF TECHNICAL DIAGNOSTICS 60

Alefrenko V., Starovoytov A.

SELECTION OF TECHNICAL MEANS FOR ANALYSIS OF
ENGINEERING-PSYCHOLOGICAL, ERGONOMIC AND
AESTHETIC CHARACTERISTICS 64

должен возникать: а) за счет увеличивающейся (из-за эффекта Пула - Френкеля) с ростом величины потенциала коронного разряда термоэлектронной эмиссией через потенциальный барьер (j_{FN}) электронов, б) за счет автоэлектронной эмиссии захваченных в окисле полупроводника носителей тока в зону проводимости $CdTe$ (j_{FN}). Поскольку вклады в общий ток от вышеперечисленных токов различны по величине, то границе раздела нарушается непрерывность тока. Таким образом, появляющиеся при этом избыточные (неравновесные) носители тока приводят к накоплению заряда на границе раздела. Это приводит к перераспределению внутреннего электрического поля, что существенно при образовании рельефа потенциального барьера.

Предлагаемая, гетероструктура $CdTe-SiO_2-Si-Al$ может работать в качестве отдельного фотоприёмника (в области 0,4-3,1 мкм), а также в качестве составной части матричного прибора, что позволяет управлять как спектральной фоточувствительностью, так и величиной максимальной чувствительности тонкие пленки $CdTe$ с сохранением селективности.

Это открывает новые возможности при обработке информации, так как обеспечивается приём сигналов с его выхода с различной спектральной фоточувствительностью, согласование с излучателем, что актуально при создании, с принципиально новыми возможностями полупроводниковых приборов с изменяемой спектральной характеристикой в широком диапазоне принимаемого электромагнитного излучения. Кроме этого, пленочные гетероструктуры имеют высокие спектральные фоточувствительности вблизи инфракрасной области спектра.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Akbarov K., Otajonov S., Alimov N. Third international conference "Physical and chemical principles of formation and modification of micro- and nanostructures". Kharkiv, Ukraine, 2009
2. Гольдман Е.И., Ждан А.Г., Чучева Г.В. Транспорт свободных ионов по слою изолятора и эффекты электронно-ионного обмена у межфазной границы полупроводник-диэлектрик при термостимулированной ионной деполяризации Si-МОП-структур // ФТП. 1999. №8. С.2024.
3. S.Zh. Karazhanov. J. Appl. Phys., 2001. 89 (8), 3707.

EXPERIMENTAL STUDY OF THE VISCOSITY OF RUBIDIUM AND CESIUM IN THE GAS PHASE

Dzis V.

Candidate of Technical Sciences,

*Associate Professor of the Department of Mathematics, Physics and Computer Technologies
Vinnytsia National Agrarian University, Ukraine*

Diachynska O.

*Lecturer of the Department of Mathematics, Physics and Computer Technologies,
Vinnytsia National Agrarian University, Ukraine*

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ В'ЯЗКОСТІ РУБІДІЮ ТА ЦЕЗІЮ В ГАЗОВІЙ ФАЗІ

Дзісь В.Г.

кандидат технічних наук,

*доцент кафедри математики, фізики та комп'ютерних технологій,
Вінницький національний аграрний університет, Україна*

Дячинська О.М.

*асистент кафедри математики, фізики та комп'ютерних технологій,
Вінницький національний аграрний університет, Україна*

Abstract

An experimental study of the viscosity of a ring channel conducted an experimental study of the viscosity of rubidium and cesium vapor at high temperatures. From experimental data on the viscosity of cesium in the gas phase, the values of the effective cross sections of the «atom-atom» collisions and the relative crosssections of the «atom-molecule» collisions were obtained. Tables of viscosity and thermal conductivity of cesium vapor at high temperatures have been developed.

Анотація

Методом вискозиметра з кільцевим каналом проведено експериментальне дослідження в'язкості пари рубідію і цезію при високих температурах. Із експериментальних даних по в'язкості цезію та рубідію в газовій фазі одержано значення ефективних перерізів зіткнень «атом-атом» та відносних перерізів зіткнень «атом-молекула». Розроблено розрахункові рівняння і таблиці в'язкості та теплопровідності в широкому інтервалі температур та тисків.

Keywords: alkali metals, cesium, gas phase, viscosity, thermal conductivity, collision cross sections.

Ключові слова: лужні метали, цезій, газова фаза, в'язкість, теплопровідність, перерізи зіткнень.

Вступ. Пара лужного металу в доступному для експериментального дослідження параметрів стану $T = 700 \dots 2000\text{K}$, $P = 1 \dots 1500\text{кПа}$ складається з атомарної і молекулярної компонент з досить малою концентрацією кластерів та заряджених частинок. Концентрація двохатомних молекул в парі однозначно визначається параметрами її стану: тиском та температурою. Отже, в'язкість та теплопровідність лужних металів в газовій фазі у виділеній області температур можна розглядати як процеси переносу в бінарній суміші розріджених ідеальних газів із врахуванням протікання реакцій дисоціації.

Теоретичні методи розрахунку коефіцієнтів в'язкості та теплопровідності пари лужних металів істотно обмежені через відсутність досить точних даних про потенціали взаємодії «атом-атом», «атом-молекула» і «молекула-молекула». Експеримент поки є єдиним джерелом одержання необхідної інформації про коефіцієнти перенесення пари лужних металів.

Експериментальні дослідження процесів перенесення в парах лужних металів пов'язані з труднощами, що виникають при реалізації експериментальних методів через високу хімічну активність лужних металів при високих температурах, а при дослідженні цезію виникає ряд додаткових ускладнень, що пов'язані з його специфічними властивостями. У реальних умовах експерименту можуть проявлятися процеси, пов'язані з термоелектронною емісією і поверхневою іонізацією, фотоефектом і фотоіонізацією, при високих температурах зростає число непружних зіткнень атомів, а при високих тисках проявляється реальність газів. Однак, можна створити такі умови експерименту, при яких перераховані ефекти помітно не проявляються, та виділити область стану пари, у якій для опису явищ переносу може бути застосована модель ідеального газу, в якому протікають реакції утворення та розпаду молекул, що дозволяє застосувати результати строгої кінетичної теорії Чепмена-Енскога і Гіршфельдера-Брокау [1] для суміші реагуючих газів та її специфічного застосування для пари лужних металів [2,3].

Мета даної роботи: встановити залежність в'язкості та теплопровідності рубідію і цезію в га-

зовій фазі від температури та тиску. Розробити розрахункові рівняння і таблиці в'язкості та теплопровідності у широкому інтервалі температур та тисків.

Метод дослідження. Експериментальні методи, які застосовувалися раніше для дослідження в'язкості парів лужних металів, крім метода віскозиметра з кільцевим каналом [4,5,6], обмежені температурою 1200-1250 К.

Для дослідження в'язкості рубідію цезію у газовій фазі застосовано метод віскозиметра з кільцевим каналом. Експериментальна установка розроблена на основі [4,5]. Вона являє собою замкнений циркуляційний контур, високотемпературна частина якого виконана з ніобієвого сплаву НБЦУ, а низькотемпературна – з нержавіючої сталі. Вимірювальним елементом комірки є кільцевий канал, утворений двома коаксіальними циліндрами. Вимірювальна комірка оснащена крапельним пристроєм, що забезпечує високу стабільність роботи випарника (генератора пари). Конструкція віскозиметра дає можливість безпосередньо вимірювати температуру внутрішньої частини вимірювального елемента, що дозволяє підвищити, точність визначення температури пари в кільцевому зазорі комірки.

Метод віскозиметра з кільцевим каналом дозволяє проводити експерименти з парами лужних металів при температурах значно вище 1200 К. Його вперше застосував В.І.Долгов [4] для дослідження в'язкості пари літію. В [4] показано перевагу даного методу над застосовуваними раніше методами вимірювання в'язкості парів лужних металів, розглянуті його недоліки. І.Ф.Степаненко [5] вдосконалив даний метод, розробив оригінальну конструкцію вимірювальної комірки. В [6] проаналізовано потік пари лужного металу в робочому зазорі віскозиметра, удосконалено методику калібрування вимірювального елемента і вимірювання витрати конденсату, істотно підвищена точність, проведено дослідження в'язкості пари літію $T = 1595 \dots 1983\text{K}$, $P = 15 \dots 107\text{кПа}$ і натрію при $T = 1109 \dots 1524\text{K}$, $P = 12 \dots 100\text{кПа}$.

Принципова схема установки наведена на рис.1.

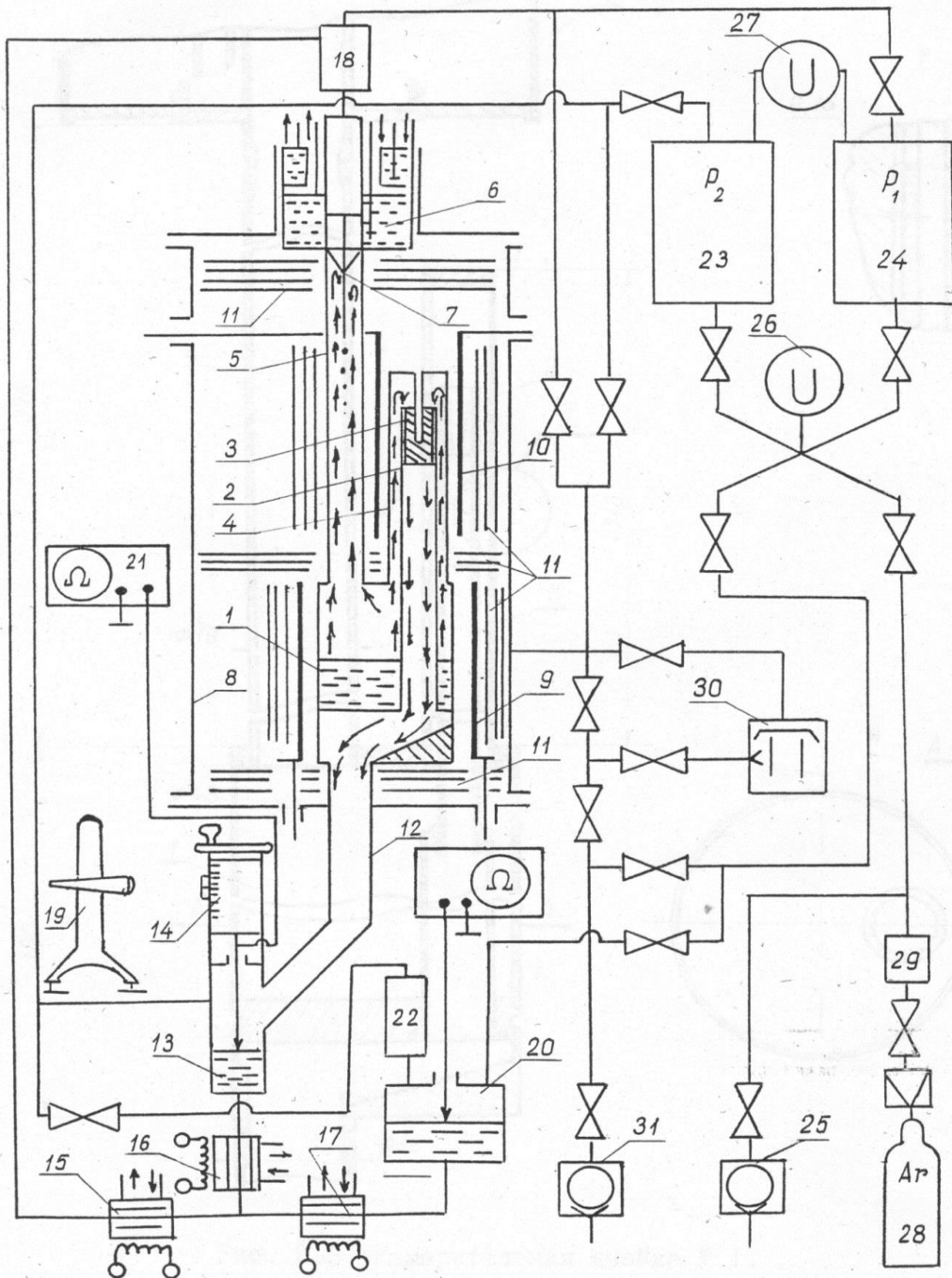


Рис.1. Принципова схема установки

Вимірювальна комірка установки (елементи 1-7) поміщена у вакуумну камеру 8. Комірка складається з випарника I, віскозиметра (елементи 2,3), пароперегрівача 4, трубки тиску 5, холодильника 6, крапельного пристрою 7. Робочим елементом віскозиметра є кільцевий зазор, утворений між внутрішньою поверхнею трубопроводу 2 і циліндричною вставкою 3. Температура випарника підтримується нагрівачем 9, віскозиметра – нагрівачем 10. Комірка має систему теплових екранів II, що складається з двох пакетів торцевих і трьох пакетів радіальних екранів. Верхній і нижній фланці вакуумної камери з'єднуються з її корпусом за допомогою канаво – клинового з'єднання. До нижнього фланця камери приварена магістраль

збору конденсату 12. До її верхньої частини за допомогою вакуумного з'єднання «куля- конус» приєднана вимірювальна комірка, а до нижньої частини комірки приєднаний витратомір 13, оснащений пристроєм фіксації малих переміщень голки витратоміра 14.

Витратомір з'єднаний із системою рідинних кранів 15, 16, 17 за допомогою яких зливна посудина 20 з'єднується з витратоміром або баластною посудиною 18. Величина зміщення голки витратоміра вимірюється катетометром 19 (тип КМ - 6), момент дотику голкою поверхні рідкого металу в витратомірі вимірюється за величиною електричного опору «голка – витратомір». Зливна посудина з'єднана з заправним пристроєм 22 через трубовід 31.

Корпус, верхній і нижній фланці вакуумної камери охолоджуються водою. Охолодження вакуумного з'єднання «куля-конус» комірці здійснюється за допомогою мідного теплоприймача, сполученого з нижнім фланцем камери.

Газова система складається з ресиверів 23, 24 і вакуумного насоса 25 (тип ЗНВР - I). Вона служить для створення робочого тиску в вимірювальній комірці і перепаду тиску на ділянці віскозиметра. Тиск аргону в системі вимірюється ртутним U – подібним манометром 26, а перепад тисків між ресиверами масляним U – подібним манометром 27, атмосферний тиск вимірюється ртутним барометром (тип МБР - 1).

Аргон у газову систему установки надходить з балона 28 через газовий фільтр 29, заповнений рідким лужним металом (відповідно Cs або Rb).

Високий вакуум ($P \approx 1 \cdot 10^{-6}$ мм. рт. ст.) в камері 8, а при необхідності в ресиверах 23, 24 створюється за допомогою високовакуумної системи, що складається з дифузійного насоса 30 (тип Н - 0,5) і механічного насоса 31 (тип 2НВР - 5ДМ). Вимірювальна комірка, газова і вакуумна системи з'єднуються між собою трубопроводами з нержавіючої сталі і комутуються між собою за допомогою вакуумних кранів.

Електричні нагрівачі 9,10 виготовлені із молібденової фольги, живляться від мережі змінного струму через низьковольтні трансформатори (тип ТНВ 220/12-1500), первинна напруга на яких встановлюється регулятором напруги РНО - 250.

Вимірювальна комірка установки (рис.2) складається з випарника 1, віскозиметра (елементи 2,5), пароперегрівача 3, труби тиску 4, холодильника 6 з крапельним пристроєм 7.

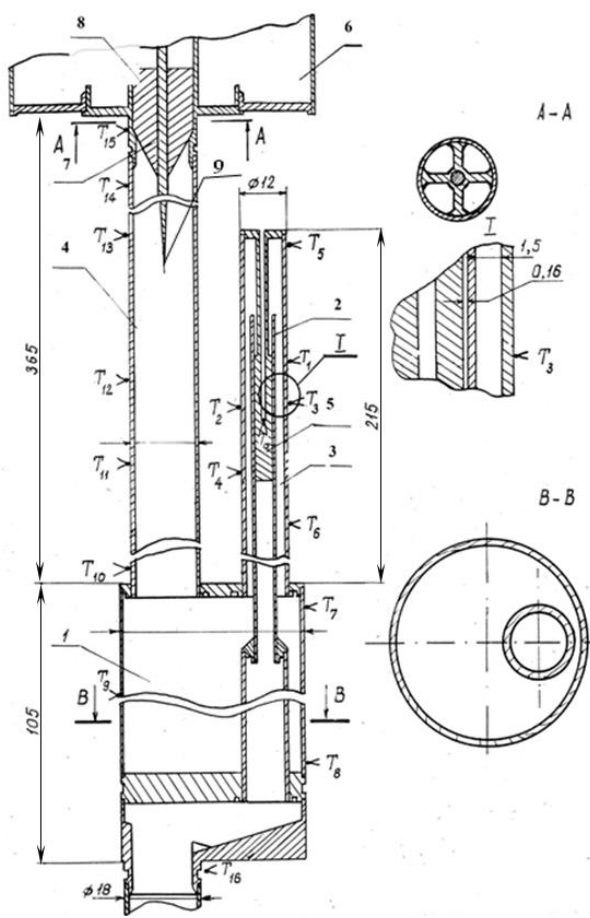


Рис. 2. Вимірювальна комірка

Робочим елементом віскозиметра є кільцевий канал, утворений між внутрішньою поверхнею трубопроводу 2 і циліндричної вставкою 5. Геометричні розміри віскозиметрів наведено в таблиці 1.

Таблиця 1

Комірка	№1	№2
Внутрішній діаметр труби, мм	$5,00 \pm 0,01$	$6,05 \pm 0,01$
Діаметр циліндричної вставки, мм	$4,68 \pm 0,01$	$5,73 \pm 0,01$
Довжина робочої частини, мм	$26,0 \pm 0,1$	$32,0 \pm 0,01$

Циліндрична вставка вставлялася в трубу 2 і приварюються до торця труби 3, верхні і нижні фіксуєчі виступи вільно ковзають по поверхні

труби (рис.2). Циліндрична вставка комірці має заглиблення для установки термопари (рис.3).

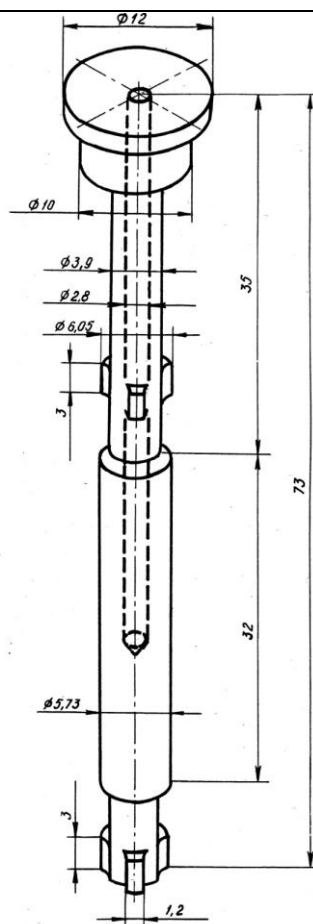


Рис. 3. Циліндрична вставка вимірювальної комірки

Всі деталі вимірювальної комірки, за винятком холодильника і голки краплинного пристрою, виконані з ніобієвого сплаву NbZr і з'єднані між собою електронно – променевим зварюванням.

Корпус холодильника виконаний з нержавіючої сталі, з'єднання нержавіюча сталь-ніобій винесено в холодну зону ($T \gg 300 \dots 400 \text{ K}$), що виключає механічні навантаження на зварне з'єднання за рахунок теплового розширення.

Холодильник вимірювальної комірки має дві секції: низькотемпературну (охладжується водою), призначену для охолодження вакуумного ущільнення комірка-верхній фланець вакуумної камери і високотемпературною ($T \sim 400 \text{ K}$, що охолоджується силіконовим маслом ПФМС - 4), призначену для охолодження крапельного пристрою.

Крапельний пристрій 9 (рис. 2) служить для конденсації і повернення рідкого лужного металу малими порціями (у вигляді крапель) в парогенератор 1. Він являє собою голкоподібний вольфрамовий стержень 7, закріплений за допомогою молібденового теплопровідника 8 в зоні холодильника. Температура комірки вимірювалася в контрольних точках $T_1 - T_{16}$ вольфрам - ренієвими термопарами BP5/20-I.

Принцип роботи установки полягає в наступному: досліджувана пара металу надходить з парогенератора в паронагрівач, проходить через вимірювальний елемент віскозиметра, конденсується в холодній частині магістралі збору конденсату і збирається в витратомірі. Перепад тиску на

вимірювальному елементі створюється через проміжний інертний газ – аргон.

В'язкість пари визначається за масовими витратами лужного металу через кільцевий канал при заданій величині перепаду тиску на вимірювальному елементі віскозиметра. Для цього установка повинна забезпечувати високу стаціонарність потоку пари в кільцевому каналі при постійних значеннях температури і тиску досліджуваного.

За кривою пружності пари лужного металу $P = f(T)$ визначається температура T і тиск насичення P_S пари досліджуваного лужного металу, що відповідають запланованим параметрам досліджуваного. У газовій системі установки створюється тиск аргону P_{Ar} , який дещо більше P_S . Розігрівається витратомір, тракт збору конденсату ($T = 400 \dots 450 \text{ K}$) і холодильник вимірювальної комірки ($T = 300 \dots 400 \text{ K}$). Генератор пари і віскозиметр виводяться на відповідний температурний режим T_K, T_B . При $P_{Ar} > P_S$ рідкий лужний метал «задавлений» аргонном. Повільно скидається тиск в газовій системі. При $P_{Ar} = P_S$ розпочинається процес кипіння лужного металу в парогенераторі вимірювальної комірки. Гаряча пара лужного металу заповнює трубу тиску. Момент кипіння фіксується за показами термопар $T_{10} \dots T_{15}$, встановлених по висоті труби тиску (рис. 5). Стоп пари лужного металу витісняє аргон з гарячої зони труби тиску в зону холодильника.

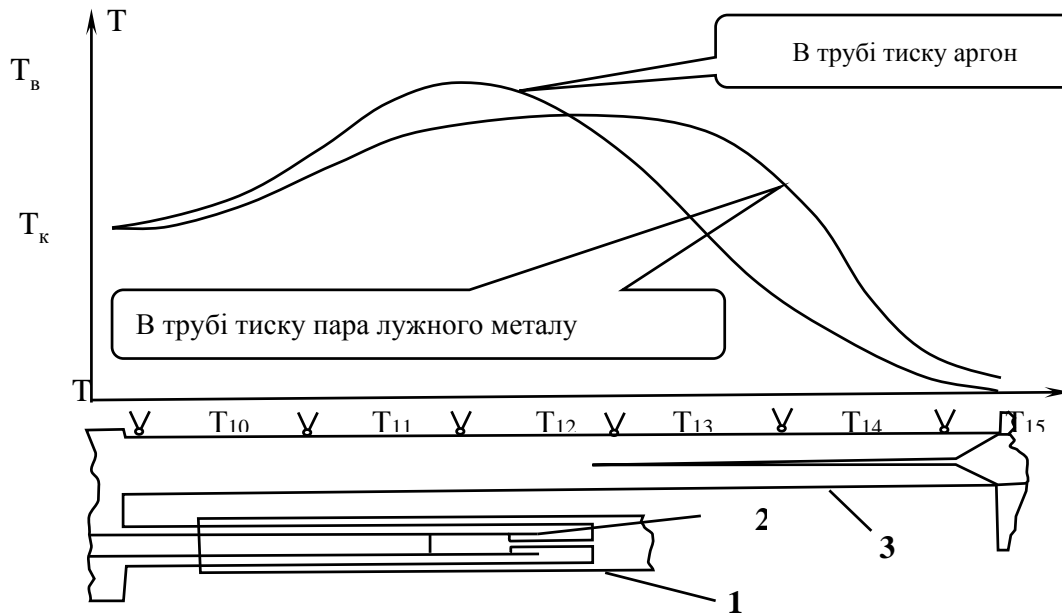


Рис. 4. Розподіл температури за висотою труби тиску:
1 – нагрівач, 2 – віскозиметр, 3 – труба тиску

Рідинні крани призначені для комутації магістралей з лужним металом. Вони являють собою (рис. 5) дві коаксіальні трубки 1,2 з електричним нагрівачем 3. У магістралі 1 знаходиться лужний метал. Зовнішня труба 2 може охолоджуватися водою або підігріватися електричним нагрівачем 3.

В холодному стані у внутрішній трубці 1 утворюється пробка з кристалічного лужного металу – кран закритий, при нагріванні ділянки магістралі вище температури плавлення лужного металу пробка ліквідується – кран відкритий.

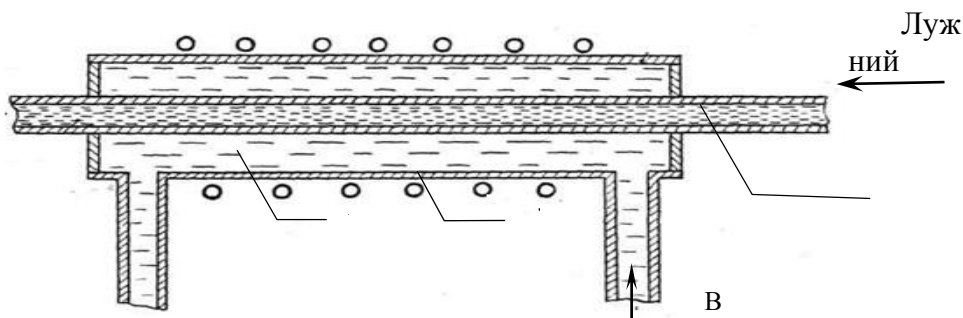


Рис. 5. Рідинний кран

Результати дослідження. Проведено дві серії дослідів з парами цезію та одна серія дослідів з парами рубідію. Досліди проводилися за ізотермами, при цьому відхилення точок на ізотермі становило 10 ... 15 К. Похибки складають 2,5-4,0%

Перша серія дослідів з парами цезію проводилася на вимірювальній комірці №1 без крапельного пристрою. Отримано 46 експериментальних значень в'язкості в інтервалі температур 900 ... 1250 К при тисках 12 ... 125 кПа [15, 20, 21]. При температурі вище 1300 К спостерігалася нестабільність в роботі парогенератора установки.

Друга серія дослідів з парами цезію проводилася з вимірювальною коміркою №2 (рис. 2, 3, 4), яка оснащена крапельним пристроєм. Крапельний пристрій забезпечив високу стабільність роботи парогенератора вимірювальної комірки в широкому інтервалі температур та тисків. Отримано 121

експериментальне значення в'язкості [20, 21], досліджений інтервал температур 960 ... 1770 К при тисках 19 ... 135 кПа.

Для рубідію отримано 61 значення в'язкості пари в інтервалі температур 990-1750К при тисках 39-135 кПа [20, 21]. Досліди проводилися на комірці №2.

Для дослідів з парами цезію та рубідію витрати лужного металу визначалися за швидкістю заповнення витратоміра. При стабільних режимах роботи установок швидкість заповнення витратоміра $V = \Delta h / \tau$ повинна бути постійною, а залежність $h = f(h)$ – лінійною. Для підвищення точності вимірювання витрат лужного металу і контролю процесу стікання конденсату в витратомір під час проведення експерименту розраховувалися коефіцієнти B , h_0 залежності $h = h_0 + B\tau$ та оцінювалися їх випадкові похибки $\delta B/B$ і $\delta h_0/h_0$. Цикл вимірювань завершувався при досягненні

необхідної точності коефіцієнтів B, h_0 . Для всіх експериментальних точок $\delta B/B < 1\%$, $\delta h_0/h_0 < 1\%$. Вимірювання рівня конденсату у витратомірі

проводилося 5-15 раз для кожного циклу. В експериментах застосовувалися лужні метали наступного хімічного складу (за паспортами підприємства-виробника):

цезій:

$$Cs \geq 99,99\% ; K < 0,002\% ; Na < 0,0005\% ; Ca < 0,005\% ; Rb < 0,001\% ;$$

рубідій:

$$Rb \geq 99,97\% ; K < 0,003\% ; Na < 0,0003\% ; Cs < 0,03\% .$$

В'язкість пари лужного металу визначалася за співвідношенням [6] :

$$\eta = \frac{\pi \mu}{24RT_T Q_m} (2P_2 + \Delta P) \Delta P^* f \varepsilon_\lambda \varepsilon_T, \tag{1}$$

$$\Delta P^* = \Delta P - (0,77 \rho V^2 - \frac{\Delta P^2}{2P_2}), \tag{2}$$

де f – значення геометричного фактору з урахуванням місцевих втрат ;

ΔP – падіння тиску на вимірювальному елементі;

Q_m – масова витрата пари;

P_2 – тиск газу на виході з каналу;

ε_λ – поправка на молекулярне ковзання;

ε_T – поправка на термічне розширення вимірювального елемента ,

T_T – температура пари у кільцевому каналі віскозиметра.

З урахуванням складу пари його молярна маса дорівнює :

$$\mu = \mu_a (1 + x_2), \tag{3}$$

де: x_2 – мольна частка молекул в парі, μ_a – молярна маса атома.

Склад пари визначався за [2]. Ефективні значення геометричних факторів f комірок і поправки на термічне розширення вимірювальних елементів ε_T визначалися за результатами калібрування по в'язкості інертних газів. Відносні похибки коефіцієнтів в'язкості оцінено за [24], результати експериментів наведено в таблиці 2.

Таблиця 2

Експериментальні значення в'язкості цезію і рубідію в газовій фазі

№	T, K	P, кПа	$\eta \cdot 10^7$, Па · с	X ₂ , %	ε_η , %	№	T, K	P, кПа	$\eta \cdot 10^7$, Па · с	X ₂ , %	ε_η , %
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Цезій. I серія дослідів											
1	903	12,0	265,5	1,49	3,9	24	1059	101,0	280,6	4,58	2,9
2	906	13,4	264,4	1,62	3,1	25	1057	76,6	282,7	3,58	2,7
3	911	15,8	263,5	1,84	3,1	26	1045	47,7	284,8	2,43	3,2
4	917	26,5	264,0	2,90	3,7	27	1128	119,7	304,2	3,92	3,0
5	916	40,4	253,6	4,31	2,7	28	1129	87,3	299,0	2,91	3,4
6	914	40,2	251,2	4,34	3,5	29	1139	66,8	307,5	2,16	3,0
7	916	48,6	252,2	5,10	2,8	30	1121	50,8	306,0	1,80	3,1
8	921	56,2	246,0	5,64	3,4	31	1134	18,4	318,0	0,63	2,9
9	924	52,1	250,2	5,17	4,2	32	1138	29,2	307,3	0,97	3,2
10	920	51,7	251,2	5,27	3,2	33	1143	74,8	313,4	2,36	3,3
11	972	86,4	264,8	6,18	2,8	34	1152	52,6	308,5	1,62	3,2
12	973	43,7	273,0	3,30	2,9	35	1133	132,9	295,6	4,23	2,7
13	1038	46,7	288,2	2,47	2,7	36	1143	112,8	300,2	3,48	3,0
14	1057	73,8	288,9	3,46	4,3	37	1139	69,8	303,6	2,25	2,7
15	1056	91,5	286,3	4,24	2,8	38	1139	31,4	316,1	1,04	2,9
16	1040	20,1	310,5	1,08	4,3	39	1245	109,8	330,3	2,27	3,3
17	1040	67,1	286,7	3,45	2,8	40	1235	132,2	323,7	2,81	2,9
18	1031	52,2	288,7	2,85	3,5	41	1234	116,9	325,3	2,51	2,9
19	1054	88,0	287,0	4,13	3,0	42	1239	91,2	334,2	1,94	2,8
20	1052	108,7	278,8	5,06	3,5	43	1240	107,1	319,6	2,26	3,0
21	1048	39,0	295,4	1,98	3,0	44	1227	42,9	330,0	0,98	3,9
22	1055	76,5	282,5	3,61	4,5	45	1233	25,6	342,7	0,57	3,1
23	1052	122,6	275,1	5,64	2,8	46	1254	48,7	348,1	1,00	3,0
Цезій. II серія дослідів											
1	964	60,7	269,6	4,70	3,4	62	1336	44,2	377,1	0,68	3,2
2	972	80,1	263,8	5,78	2,8	63	1337	99,1	374,2	1,49	2,7
3	973	27,3	273,4	2,11	2,8	64	1338	69,2	370,1	1,05	2,8
4	974	30,5	277,7	2,34	2,7	65	1343	91,9	372,2	1,36	2,7
5	975	44,2	271,9	3,30	2,7	66	1350	121,2	367,2	1,73	3,4

6	975	36,2	273,6	2,73	2,8	67	1427	57,3	395,8	0,65	3,1
7	975	20,8	282,6	1,61	2,9	68	1429	98,8	391,6	1,11	3,2
8	977	71,0	265,2	5,05	2,7	69	1429	130,4	392,8	1,46	2,7
9	977	88,3	263,2	6,13	2,7	70	1430	68,0	404,0	0,77	2,9
10	978	58,0	268,5	4,17	2,8	71	1430	120,5	395,8	1,34	2,9
11	978	33,7	276,3	2,51	2,8	72	1430	28,8	404,6	0,33	2,7
12	978	93,9	264,6	6,44	2,7	73	1431	73,2	387,0	0,82	2,9
13	980	74,4	269,2	5,18	2,7	74	1433	113,8	397,5	1,26	2,8
14	1040	70,8	284,6	3,62	2,8	75	1434	20,0	413,9	0,28	2,9
15	1046	38,0	293,7	1,95	2,8	76	1435	89,3	402,8	0,99	3,0
16	1047	106,9	283,0	5,11	3,1	77	1437	117,4	405,6	1,28	3,1
17	1048	75,8	291,0	3,71	2,6	78	1446	95,8	405,3	1,03	2,6
18	1048	43,7	296,2	2,20	2,8	79	1498	100,9	424,5	0,93	3,3
19	1049	54,5	290,0	2,71	3,1	80	1498	71,3	416,8	0,66	2,8
20	1049	133,7	278,1	6,18	2,7	81	1499	113,8	410,1	1,04	2,7
21	1050	84,5	280,2	4,06	3,5	82	1500	35,9	432,1	0,33	2,8
22	1052	122,1	272,0	5,62	2,9	83	1501	75,0	418,7	0,69	3,0
23	1068	80,3	292,2	3,55	2,8	84	1503	94,0	410,0	0,86	3,1
24	1128	58,6	305,7	2,00	2,7	85	1504	30,5	430,7	0,28	2,8
25	1129	112,7	305,9	3,69	2,7	86	1504	134,1	414,3	1,21	2,8
26	1129	45,3	316,6	1,55	3,5	87	1505	57,9	420,1	0,53	3,2
27	1130	86,4	309,1	2,89	2,9	88	1506	98,8	426,3	0,89	2,7
28	1134	75,9	312,5	2,49	2,7	89	1508	43,8	426,4	0,40	2,8
29	1134	41,1	312,4	1,38	3,2	90	1508	131,3	423,3	1,17	2,9
30	1136	103,2	312,4	3,30	2,7	91	1508	121,3	410,2	1,09	3,0
31	1138	58,0	318,0	1,89	3,2	92	1510	83,4	427,2	0,75	2,6
32	1144	72,6	310,8	2,29	2,7	93	1513	47,8	430,1	0,43	2,6
33	1225	98,8	333,1	2,21	2,7	94	1596	58,8	459,4	0,42	2,8
34	1225	76,4	341,4	1,73	2,8	95	1597	117,3	450,6	0,83	2,9
35	1226	106,7	325,3	2,37	3,2	96	1598	114,3	446,0	0,81	2,6
36	1228	66,8	349,0	1,50	2,8	97	1598	19,4	435,1	0,14	2,7
37	1229	131,6	332,5	2,86	2,7	98	1600	90,9	448,1	0,64	2,8
38	1231	51,3	348,9	1,15	2,5	99	1601	106,4	457,1	0,75	2,7
39	1231	124,8	336,6	2,70	2,8	100	1603	99,3	452,1	0,70	3,4
40	1231	29,4	346,0	0,66	3,4	101	1605	83,8	451,9	0,59	2,6
41	1233	58,0	343,8	1,28	2,8	102	1607	72,0	442,9	0,50	2,9
42	1234	39,5	348,7	0,88	2,8	103	1607	38,4	442,8	0,27	2,8
43	1236	115,4	347,6	2,46	3,0	104	1608	30,4	464,0	0,21	3,0
44	1236	85,7	340,5	1,85	2,8	105	1609	20,3	460,8	0,14	2,9
45	1237	43,8	343,3	0,96	3,8	106	1609	36,0	429,3	0,25	2,7
46	1239	38,0	349,0	0,83	2,7	107	1610	45,8	459,3	0,32	2,5
47	1325	39,0	375,5	0,62	2,9	108	1610	26,3	465,0	0,18	2,9
48	1326	79,7	372,7	1,25	3,0	109	1691	101,6	452,8	0,58	2,7
49	1328	80,2	367,7	1,25	2,6	110	1693	119,1	454,7	0,67	2,8
50	1328	100,6	367,0	1,56	3,1	111	1696	112,4	452,6	0,63	2,7
51	1329	113,8	366,6	1,75	3,4	112	1729	84,2	468,4	0,44	3,1
52	1329	133,8	364,1	2,04	2,8	113	1747	102,2	469,0	0,51	2,8
53	1329	120,7	366,8	1,85	3,4	114	1751	86,1	466,9	0,43	2,9
54	1330	88,1	367,5	1,36	2,7	115	1752	108,7	475,6	0,54	2,9
55	1330	58,5	372,9	0,91	4,2	116	1758	74,9	468,4	0,37	2,9
56	1332	58,0	368,3	0,90	2,8	117	1763	35,9	482,6	0,18	3,2
57	1332	43,5	371,4	0,68	2,9	118	1764	53,3	486,0	0,26	2,8
58	1334	72,6	372,0	0,11	2,9	119	1767	42,9	480,2	0,21	2,9
59	1334	48,7	368,7	0,75	3,3	120	1770	98,1	464,9	0,47	2,8
60	1335	31,2	376,3	0,48	4,2	121	1770	64,6	475,4	0,31	3,1
61	1335	127,0	373,3	1,90	2,7						
Рубідій											
1	989	41,9	255,9	3,41	2,9	32	1312	111,2	335,4	1,87	2,7
2	995	114,2	235,9	8,10	3,0	33	1313	59,2	334,6	1,01	3,1
3	996	59,5	251,1	4,52	3,3	34	1322	135,9	323,7	2,19	2,9

4	998	105,6	232,1	7,45	2,7	35	1437	117,6	363,6	1,28	3,1
5	998	87,0	242,8	6,29	3,0	36	1438	108,9	372,5	1,19	3,1
6	1010	110,4	233,8	7,25	3,1	37	1440	75,5	355,7	0,82	3,0
7	1096	132,7	262,9	5,51	3,0	38	1443	90,2	361,2	0,97	3,0
8	1098	100,8	275,3	4,25	3,0	39	1444	118,1	358,7	1,26	4,0
9	1098	126,7	259,1	5,24	2,8	40	1444	39,6	364,7	0,43	3,2
10	1100	86,0	277,1	3,64	3,7	41	1445	135,9	354,2	1,44	3,1
11	1102	60,2	281,0	2,50	2,9	42	1447	65,3	369,2	0,70	3,0
12	1103	103,5	278,4	4,25	2,9	43	1447	52,8	366,0	0,57	3,7
13	1104	79,3	281,2	3,31	3,0	44	1449	56,2	364,7	0,60	3,2
14	1104	124,6	262,3	5,01	3,5	45	1450	39,6	372,0	0,42	3,0
15	1105	76,5	278,8	3,18	3,0	46	1452	46,8	361,1	0,49	3,9
16	1105	63,0	283,5	2,65	3,3	47	1563	106,3	409,0	0,80	4,0
17	1112	43,1	284,3	1,78	3,3	48	1563	104,6	400,4	0,79	3,1
18	1115	35,1	287,4	1,43	4,7	49	1578	121,5	400,7	0,87	3,6
19	1122	116,3	271,4	4,32	4,0	50	1580	90,4	404,3	0,65	3,2
20	1231	70,4	316,9	1,65	3,0	51	1582	126,3	396,8	0,90	3,1
21	1236	43,5	316,5	1,01	3,6	52	1583	102,5	401,3	0,73	3,1
22	1237	79,7	316,5	1,82	3,6	53	1584	80,2	414,0	0,57	3,5
23	1240	114,1	297,5	2,54	3,1	54	1584	134,8	401,6	0,95	3,1
24	1246	120,7	315,0	2,61	2,7	55	1591	125,7	400,2	0,87	3,0
25	1249	126,7	306,6	2,70	3,1	56	1734	105,3	451,9	0,51	3,1
26	1299	120,6	324,6	2,12	2,8	57	1736	80,3	450,4	0,39	3,9
27	1300	78,8	333,8	1,40	3,3	58	1739	134,0	442,4	0,64	4,2
28	1300	86,4	330,1	1,53	3,0	59	1740	94,9	453,5	0,45	2,9
29	1301	102,8	331,0	1,81	3,1	60	1746	123,8	445,5	0,58	3,0
30	1308	126,3	321,7	2,15	3,9	61	1751	125,4	449,1	0,58	3,3
31	1311	112,7	321,7	1,90	3,1						

В'язкість пари лужного металу можна виразити через два параметри [2,3]: ефективні перерізи зіткнень «атом-атом» $\sigma_{11}^2 \Omega_{11}^{(2,2)*}$ та відносні перерізи зіткнень «атом-молекула» β_{12}^2 . Ефективні перерізи зіткнень «атом-атом» $\sigma_{11}^2 \Omega_{11}^{(2,2)*}(T)$ характеризують залежність в'язкості одноатомної пари від температури, а відносні β_{12}^2 – залежність в'язкості від концентрації двохатомних молекул, яка є функцією тиску.

В'язкість одноатомної пари η_1 в широкому інтервалі температури лінійно залежить від температури:

$$\eta_1(T) = \eta_0 + A(T - 1000). \quad (4)$$

В'язкість одноатомної пари $\eta_1(T)$ та ефективні перерізи зіткнень атомів $\sigma_{11}^2 \Omega_{11}^{(2,2)*}(T)$ зв'язані між собою співвідношенням:

$$\eta_1(T) \cdot 10^7 = \frac{26,693 \sqrt{\mu T}}{\sigma_{11}^2 \Omega_{11}^{(2,2)*}(T)}, \quad (5)$$

де μ – молярна маса атомарного газу, T – абсолютна температура газу.

Для визначення невідомих параметрів η_0, A, β_{12}^2 залежностей (4, 5) потрібно мінімізувати цільову функцію

$$F(\eta_0, A, \beta_{12}^2) = \sum_{i=1}^N q_i^2 (\eta_i - \eta_{Ti})^2, \quad (6)$$

де η_i – експериментальне значення в'язкості, q_i – ваговий коефіцієнт i -го значення в'язкості, η_{Ti} – значення в'язкості обчислене за схемою ідеального дисоціюючого газу [2, 3].

$$\eta_{Ti} = \left[\eta_0 + A(T - 1000) \frac{1 + b_{1\eta} x_2 + b_{2\eta} x_2^2}{1 + a_{1\eta} x_2 + a_{2\eta} x_2^2} \right], \quad (7)$$

де x_2 – молярна доля двохатомних молекул в парі;

$a_{1\eta}, a_{2\eta}, b_{1\eta}, b_{2\eta}$ – коефіцієнти, які визначаються через перерізи зіткнень «атом-атом» $\sigma_{11}^2 \Omega_{11}^{(2,2)*}$ та «атом-молекула» в парі лужних металів β_{12}^2 [5,23]:

$$\left. \begin{aligned} a_{1\eta} &= 2 \left(0,5\sqrt{3} \beta_{12}^2 + \frac{9\sqrt{6}}{40} A_{12}^* \beta_{12}^2 - 1 \right) / (1 + 0,3A_{12}^*) \\ a_{2\eta} &= -(a_{1\eta} + 1) + 0,5\sqrt{2} (1 + 1,2A_{12}^*) \beta_{12}^2 / (1 + 0,3A_{12}^*) \\ b_{1\eta} &= -1,8A_{12}^* \left(1 - 0,5\sqrt{2} \beta_{12}^2 - \frac{\sqrt{4}}{4} A_{12}^* \beta_{12}^2 \right) / (1 + 0,3A_{12}^*) \\ b_{2\eta} &= -b_{1\eta} + 0,9A_{12}^* (1 + 0,3A_{12}^*) \\ \beta_{12}^2 &= \frac{\sigma_{12}^2 \Omega_{12}^{(2,2)*}}{\sigma_{11}^2 \Omega_{11}^{(2,2)*}} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Вагові коефіцієнти експериментальних точок призначалися за рекомендаціями [24] :

$$\left. \begin{aligned} q_i &= \frac{p_i}{\sum_{i=1}^n p_i} \\ p_i &= \frac{1}{S_{\Sigma}^2(\eta_i)} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Мінімізацію цільової функції (6) проведено методом покоординатного спуску. Результати

мінімізації цільової функції $F(\eta_0, A, \beta_{12}^2)$ для отриманих експериментальних значень в'язкості Cs і Rb в газовій фазі, при енергії дисоціації молекул цезію $D_{0Cs}^0 = 44380 \pm 1000$ Дж/моль [19] і рубідію $D_{0Rb}^0 = 48570 \pm 1000$ Дж/моль [19] наведено в таблиці 3.

Таблиця 3.

Результати обробки експериментальних даних

Метал	Коефіцієнти рівняння 5		β_{12}^2 ,	$\Delta\eta$,	ΔA ,	$\Delta\beta_{12}^2$,
	$\eta_0 \cdot 10^7$, Па·с	$A \cdot 10^7$, Па·с/К				
Цезій	292,4	0,256	2,2	1,8	2,4	5,2
Рубідій	268,4	0,233	2,3	2,1	3,0	6,5

Розрахуємо ефективні перерізи зіткнень атомів $\sigma_{11}^2 \Omega_{11}^{(2,2)*}(T)$ для пари Cs і Rb . Згідно рівняння (5) маємо:

T, К	700	900	1000	1100	1200	1300	1500	1700	1800	
$\sigma_{11}^2 \Omega_{11}^{(2,2)*}, A^{\circ 2}$	Cs	37,8	34,6	33,3	32,1	31,0	30,1	28,4	26,9	26,3
	Rb	32,9	30,2	29,1	28,1	27,1	26,3	24,8	23,6	23,0

В інтервалі температур 700...2000К залежність ефективних перерізів зіткнень «атом-атом» від температури апроксимується рівняннями:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{11}^2 \Omega_{11}^{(2,2)*}(T)_{Cs} &= 54.7 - 32.5 \frac{T}{1000} + 13.29 \left(\frac{T}{1000} \right)^2 - 2.22 \left(\frac{T}{1000} \right)^3, \quad A^{\circ 2} \\ \sigma_{11}^2 \Omega_{11}^{(2,2)*}(T)_{Rb} &= 41.7 - 26.8 \frac{T}{1000} + 10.50 \left(\frac{T}{1000} \right)^2 - 1.69 \left(\frac{T}{1000} \right)^3, \quad A^{\circ 2} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

Залежності відносних перерізів зіткнень «атом-молекула» β_{12}^2 від температури встановити не вдалося, оскільки похибка $\Delta\beta_{12}^2$ занадто велика. Легко показати, що для її зменшення до 5%, необхідно значно розширити досліджуваний інтервал тисків $\Delta P \sim 1..2$ МПа і підвищити точність вхідних експериментальних даних в'язкості пари лужних металів до 1...2%, що на даний час є досить складною науковою-технічною проблемою. Перерізи зіткнень «атом-атом» $\sigma_{11}^2 \Omega_{11}^{(2,2)*}$ пари узгоджуються з літературними даними. З рис. 5 видно, що отримані перетини зіткнень «атом – атом» $\sigma_{11}^2 \Omega_{11}^{(2,2)*}$ в нашому дослідженні для пари Cs при $T \leq 1200K$ практично збігаються з результатами [13], добре узгоджуються з даними таблиць ГСССД P72-84 [27] і усередненими значеннями перерізів за

результатами спільної обробки експериментальних даних в'язкості і теплопровідності [7,9,10]. З точністю до 4 ... 7 %, тобто в межах загальної похибки узгоджуються з даними [34]. При температурі до 1300 К перетини $\sigma_{11}^2 \Omega_{11}^{(2,2)*}$ узгоджуються в межах загальної похибки з даними [19], однак зі зростанням температури розходяться, і при $T = 1800$ К розбіжність складає 13 %. Таку розбіжність можна пояснити тим, що при температурах вище 1300 К для парів цезію $(\lambda_s - \lambda_1) / \lambda_1 \sim 5 \dots 10$ % [5], а в області параметрів дослідів [19] $(\lambda_s - \lambda_1) / \lambda_1 \sim 1,0 \dots 3,0$ %, що при загальній похибці експерименту $\Delta\lambda \sim 5\%$ важко отримати достатньо точні перетини зіткнень $\sigma_{11}^2 \Omega_{11}^{(2,2)*}$ і β_{12}^2 . Крім того, при високих температурах в досліді по теп-

лопровідності необхідно вводити безліч різних поправок, враховувати ряд супутніх ефектів, що знижує точність кінцевих результатів.

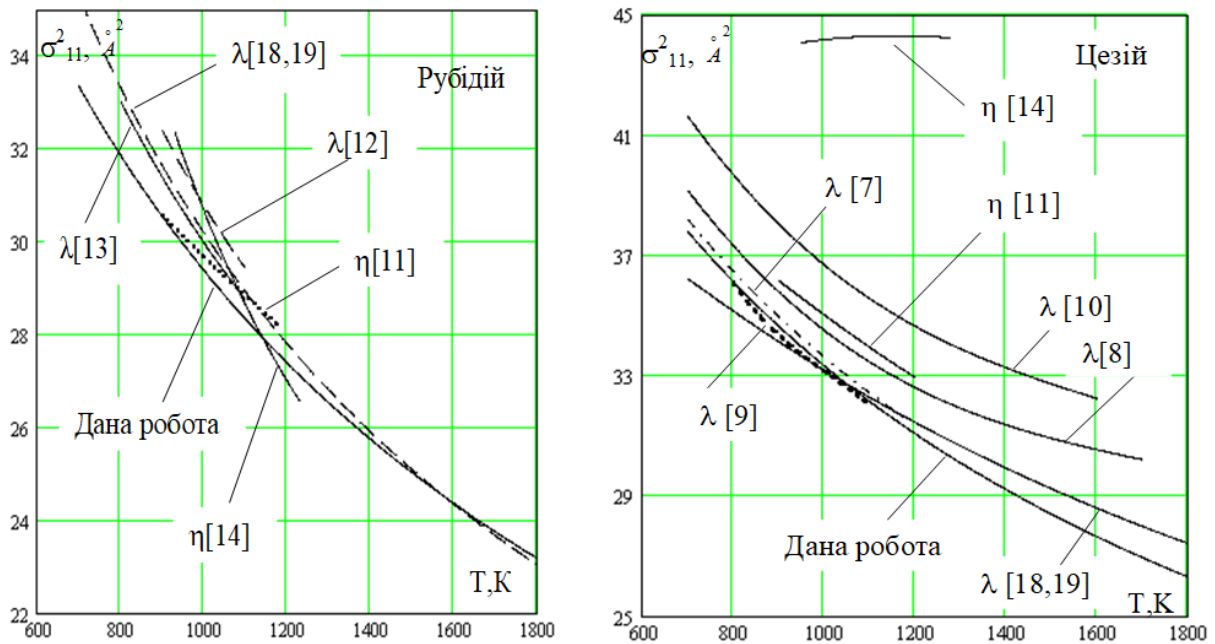


Рис. 6. Перерізи зіткнень «атом-атом» $\sigma_{11}^2 \Omega_{11}^{(2,2)*}$ рубідію та цезію в газовій фазі

Ефективні перерізи зіткнень $\sigma_{11}^2 \Omega_{11}^{(2,2)*}$ для пари *Rb* (рис. 6) за результатами нашої роботи узгоджуються в спільних областях дослідів при $T \leq 1200\text{K}$ з результатами робіт [11, 12, 13, 14, 18, 19] та розходяться з деякими з них в області екстраполяції. Залежності від температури перетинів зіткнень $\sigma_{11}^2 \Omega_{11}^{(2,2)*}$ для всіх робіт по в'язкості і теплопровідності пари *Rb* мають різний характер. Це пояснюється тим, що всі вони виконані у вузькому інтервалі температур, що не дозволяє надійно встановити температурну залежність $\sigma_{11}^2 \Omega_{11}^{(2,2)*}(T)$.

З дослідів по в'язкості даної роботи однозначно встановлено негативний ефект тиску для *Cs* і *Rb* ($\beta_{12}^2 > 1,21$). Для всіх експериментальних точок $(\lambda_s - \lambda_1) / \lambda_1 \leq 0$, тобто в'язкість зменшується з підвищенням тиску (збільшенням концентрацій двохатомних молекул x_2).

За відносними перетинами зіткнень β_{12}^2 в парі *Cs* (табл. 4) дані цієї роботи узгоджуються з даними [7, 11, 19]. Виняток становлять роботи [9, 14], в яких при $T \sim 1080\text{K}$ спостерігається різка зміна β_{12}^2 . Дані цієї роботи цього ефекту не підтверджують.

Таблиця 4.

Відносні перерізи зіткнень β_{12}^2 цезію у газовій фазі за результатами робіт з в'язкості та теплопровідності ($\Delta\beta_{12}^2 \sim 20\%$)

Джерело	[14,25]	[11]	[7]	[9]	[19]	Дана робота
β_{12}^2	2,5-1,0	2,08	2,1	2,56-0,96	2,1	2,2

Відносні перетину зіткнень β_{12}^2 для пари *Rb* за результатами цієї роботи узгоджуються з літературними даними, отриманими з експериментальних

з в'язкості та теплопровідності при $T = 700 \dots 1200\text{K}$ (табл. 5).

Таблиця 5.

Відносні перерізи зіткнень β_{12}^2 рубідію у газовій фазі за результатами робіт з в'язкості та теплопровідності ($\Delta\beta_{12}^2 \sim 20\%$)

Джерело	[11]	[12]	[25]	[13]	[17,18,26]	Дана робота
β_{12}^2	2,4	2,17	2,44	2,21	2,24-0,0001T	2,3

Таким чином, отримані в даній роботі перетини зіткнень $\sigma_{11}^2 \Omega_{11}^{(2,2)*}$ і β_{12}^2 в парі *Cs* і *Rb* для $T \leq 1200\text{K}$ знаходяться в доброму узгодженні з більшістю експериментальних робіт з в'язкості і теплопровідності. Перетини $\sigma_{11}^2 \Omega_{11}^{(2,2)*}$ — отримані

нами з обробки дослідів по в'язкості, виконаних в більш широкому інтервалі температур, що збільшує надійність визначення залежності $\sigma_{11}^2 \Omega_{11}^{(2,2)*}(T)$. Ці обставини дозволяють використовувати отримані в даній роботі перетини

$\sigma_{11}^2 \Omega_{11}^{(2,2)*}$ і β_{12}^2 для розробки рекомендованих таблиць коефіцієнтів переносу цезію та рубідію в газовій фазі. Розроблено таблиці в'язкості і тепло-

провідності пари рубідію і цезію в інтервалі температур 700-2000 К при тисках 1-1500 кПа, включаючи лінію насичення. Коефіцієнти в'язкості розраховано за рівняннями (7, 8), а теплопровідності за рівняннями [2, 5]:

$$\lambda(x_2, T) = \lambda_1(T) \left\{ 1 + \sum_{n=1}^m B_n x_2^n + B_p \left(\frac{T_p}{T} \right)^2 \frac{x_2(1-x_2)}{(1+x_2)^2} \right\}, \quad (11)$$

де

$$B_p = 0,3335\beta_{12}^{-2}, \quad (12)$$

$$B_n = B_n^{(n)} + B_n^{(BH)}, \quad (13)$$

$$\left. \begin{aligned} B_1^{(n)} &= -a_{1\lambda} + b_{1\lambda} \\ B_2^{(n)} &= -a_{1\lambda} B_1^{(n)} - a_{2\lambda} b_{2\lambda} \\ &\dots \dots \dots \\ B_n^{(n)} &= -a_{1\lambda} B_{n-1}^{(n)} + a_{2\lambda} B_{n-2}^{(n)}, n \geq 3 \\ B_1^{(BH)} &= 0,3325\beta_{12}^2 \left(\frac{C_{p,2}}{R} - \frac{5}{2} \right) \\ B_2^{(BH)} &= B_1^{(BH)} (1 - 1,2248\beta_1^{-2})^1 \\ &\dots \dots \dots \\ B_n^{(BH)} &= B_1^{(BH)} (1 - 1,2248\beta_1^{-2})^{n-1} \\ T_p &= \frac{D_0(T)}{R}. \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

Тиск пари лужного металу на лінії насичення визначається за співвідношенням [22]:

$$\ln P_s = c \cdot \ln \tau + \sum_{i=-1}^n a_i \tau^i, \quad (16)$$

де $\tau = T \cdot 10^{-3} \text{К}$, P_s – тиск на лінії насичення, МПа, c, a_i – термодинамічні константи.

Розраховані значення коефіцієнтів в'язкості і теплопровідності наведено в табл. 6-9 (де η_1 і λ_1 –

в'язкість і теплопровідність одноатомної пари; η_s і λ_s – в'язкість і теплопровідність на лінії насичення.

Похибки наведених табличних величин коефіцієнтів в'язкості та теплопровідності складають (оцінки похибок проведено за методикою [24]):

для цезію :

при $T \leq 1600 \text{ К}$, $\eta_1 = 3\%$, $\eta_s = 5\%$, $\lambda_1 = 4\%$, $\lambda_s = 6\%$;

при $T \leq 1750 \text{ К}$, $\eta_1 = 4,5\%$, $\eta_s = 7\%$, $\lambda_1 = 5\%$, $\lambda_s = 8\%$;

при $T > 1750 \text{ К}$, $\eta_1 = 5\%$, $\eta_s = 10\%$, $\lambda_1 = 8\%$, $\lambda_s = 10\%$;

для рубідію :

при $T \leq 1600 \text{ К}$, $\eta_1 = 3,5\%$, $\eta_s = 5\%$, $\lambda_1 = 4,5\%$, $\lambda_s = 6\%$;

при $T \leq 1750 \text{ К}$, $\eta_1 = 5\%$, $\eta_s = 7\%$, $\lambda_1 = 5,5\%$, $\lambda_s = 8\%$;

при $T > 1750 \text{ К}$, $\eta_1 = 6\%$, $\eta_s = 10\%$, $\lambda_1 = 7\%$, $\lambda_s = 10\%$;

Таблиця 6.

В'язкість цезію в газовій фазі $\eta \cdot 10^7$, Па · с

T, K	η_1	Тиск, кПа									η_s
		1	10	25	50	100	400	600	1000	1500	
700	215,6	215,7									203,6
750	228,4	226,6	212,6								212,4
800	241,2	240,0	230,2								220,6
850	254,0	253,2	246,1	236,0							228,4
900	266,8	266,2	261,0	253,1	242,1						235,9
950	279,6	279,1	275,2	269,0	260,0	245,4					243,1
1000	292,4	292,0	288,9	284,1	276,7	264,1					250,2
1050	305,2	304,9	302,4	298,5	292,4	281,7					257,2
1100	318,0	317,8	315,8	312,5	307,4	298,3					264,1
1150	330,8	330,6	329,0	326,3	322,0	314,1	279,8				271,0
1200	343,6	343,4	342,0	339,8	336,1	329,3	298,1	283,5			277,9
1250	356,4	356,3	355,1	353,1	350,0	344,1	315,8	301,8			284,9
1300	369,2	369,1	368,1	366,4	363,7	358,4	332,8	319,6	299,2		291,9
1350	382,0	381,9	381,0	379,5	377,2	372,6	349,3	336,9	317,2		299,0
1400	394,8	394,7	393,9	392,6	390,5	386,4	365,3	353,7	334,8	316,7	306,2
1450	407,6	407,5	406,8	405,7	403,8	400,1	380,9	370,1	352,0	334,3	313,6
1500	420,4	420,3	419,7	418,7	417,0	413,7	396,1	386,0	368,9	351,7	321,1
1550	433,2	433,1	432,6	431,7	430,1	427,2	411,0	401,6	385,3	368,7	328,6
1600	446,0	445,9	445,4	444,6	443,2	440,5	425,6	416,8	401,4	385,4	336,4
1650	458,8	468,7	458,3	457,5	456,3	453,8	440,1	431,8	417,3	401,8	344,2
1700	471,6	471,6	471,1	470,4	469,3	467,0	454,3	446,6	432,8	417,9	352,2
1750	484,4	484,4	484,0	483,3	482,3	480,2	468,4	461,2	448,1	433,8	360,3
1800	497,2	497,2	496,8	496,6	495,2	493,3	482,3	475,5	463,1	449,5	368,5
1850	510,0	510,0	509,6	509,1	508,2	506,4	496,1	489,7	478,0	464,9	376,7
1900	522,8	522,8	522,5	521,9	521,1	519,4	509,8	503,8	492,6	480,1	384,9
1950	535,6	536,6	535,3	534,8	534,0	532,4	523,4	517,7	507,1	495,1	–
2000	548,4	548,4	548,1	547,7	546,9	545,4	536,9	531,5	521,5	510,0	–

Таблиця 7.

Теплопровідність цезію в газовій фазі $\lambda \cdot 10^4$, Вт/(м · К)

T, K	λ_1	Тиск, кПа									λ_s
		1	10	25	50	100	400	600	1000	1500	
700	50,6	53,7									62,9
750	53,6	55,3	67,2								67,4
800	56,6	57,5	64,9								71,5
850	59,6	60,2	64,8	70,9							75,3
900	62,6	63,0	65,9	70,2	75,7						78,6
950	65,6	65,8	67,8	70,7	74,8	80,8					81,6
1000	68,6	68,8	70,1	72,2	75,1	79,8					84,4
1050	71,6	71,7	72,6	74,1	76,3	79,9					86,9
1100	74,6	74,7	75,3	76,4	78,0	80,8					89,2
1150	77,6	77,7	78,1	78,9	80,1	82,2	89,8				91,3
1200	80,6	80,6	81,0	81,6	82,5	84,1	90,3	92,6			93,4
1250	83,6	83,6	83,9	84,3	85,0	86,2	91,3	93,3			95,3
1300	86,6	86,6	86,8	87,1	87,7	88,6	92,7	94,5	96,6		97,2
1350	89,6	89,6	89,8	90,0	90,4	91,2	94,5	95,9	97,8		99,1
1400	92,6	92,6	92,7	92,9	93,2	93,8	96,5	97,7	99,3	100,4	100,9
1450	95,6	95,6	96,7	95,8	96,1	96,5	98,6	99,6	101,0	102,0	102,7
1500	98,6	98,6	98,7	98,8	99,0	99,3	101,0	101,8	102,9	103,8	104,6
1550	101,6	101,6	101,7	101,7	101,9	102,2	103,5	104,1	105,1	105,7	106,5
1600	104,6	104,6	104,6	104,7	104,8	105,0	106,1	106,6	107,3	107,9	108,4
1650	107,6	107,6	107,6	107,7	107,8	107,9	108,7	109,1	109,7	110,1	110,4
1700	110,6	110,6	110,6	110,7	110,7	110,8	111,4	111,7	112,2	112,5	112,4
1750	113,6	113,6	113,6	113,6	113,7	113,8	114,2	114,4	114,7	114,9	114,3
1800	116,6	116,6	116,6	116,6	116,7	116,7	117,0	117,2	117,4	117,5	116,3
1850	119,6	119,6	119,6	119,6	119,6	119,7	119,9	120,0	120,1	120,1	118,7
1900	122,6	122,6	122,6	122,6	122,6	122,6	122,8	122,8	122,8	122,8	121,1
1950	125,6	125,6	125,6	125,6	125,6	125,6	125,7	125,7	125,6	125,6	–
2000	128,6	128,6	128,6	128,6	128,6	128,6	128,6	128,5	128,5	128,3	–

Таблиця 8.

В'язкість рубідію в газовій фазі $\eta \cdot 10^7$, Па · с

T, K	η_1	Тиск, кПа									η_s
		1	10	25	50	100	400	600	1000	1500	
700	198,5	194,2									186,2
750	210,1	207,6									193,7
800	221,8	220,2	207,4								200,8
850	233,4	232,4	223,4	211,1							207,4
900	245,1	244,3	237,9	228,5	215,8						213,9
950	256,7	256,2	251,4	244,2	233,8						220,1
1000	268,4	268,0	264,3	258,7	250,3	236,5					226,2
1050	280,0	279,7	276,9	272,4	265,6	253,8					232,2
1100	291,7	291,4	289,2	285,6	280,0	270,0					238,2
1150	303,3	303,1	301,3	298,4	293,7	283,3	249,8				244,2
1200	315,0	314,8	313,3	310,9	307,0	299,8	267,7	253,0			250,2
1250	326,6	326,5	325,3	323,2	319,9	313,7	284,8	270,8			256,3
1300	338,3	338,2	337,1	335,4	332,6	327,2	301,2	288,0	267,9		262,4
1350	349,9	349,8	348,9	347,4	345,0	340,4	317,0	304,6	285,3		268,6
1400	361,6	361,5	360,7	359,4	357,3	353,2	332,2	320,7	302,2	284,6	274,8
1450	373,2	373,2	372,5	371,3	369,5	365,9	346,9	336,3	318,7	301,5	281,1
1500	384,9	384,8	384,2	383,2	381,6	378,4	361,2	351,3	334,7	318,1	287,6
1550	396,5	396,5	395,9	395,1	393,6	390,7	375,1	366,0	350,3	334,3	294,1
1600	408,2	408,1	407,7	406,9	405,5	403,0	388,7	380,3	365,6	350,2	300,8
1650	419,8	419,8	419,4	418,6	417,5	415,1	402,1	394,3	380,4	365,7	307,5
1700	431,5	431,5	431,1	430,4	429,3	427,2	415,3	408,0	395,0	380,9	314,5
1750	443,1	443,1	442,8	442,2	441,2	439,2	428,2	421,5	409,3	395,9	321,5
1800	454,8	454,8	454,4	453,9	453,0	451,2	441,0	434,8	423,3	410,5	328,7
1850	466,4	466,4	466,1	465,6	464,8	463,1	453,7	447,9	437,0	424,9	336,1
1900	478,1	478,1	477,8	477,3	476,6	475,0	466,3	460,8	450,6	439,1	343,7
1950	489,7	489,7	489,5	489,0	488,3	486,9	478,8	473,6	464,0	453,1	351,4
2000	501,4	501,4	501,1	500,7	500,1	498,8	491,1	486,3	477,2	466,8	359,4

Таблиця 9

Теплопровідність рубідію в газовій фазі $\lambda \cdot 10^4$, Вт/(м · К)

T, K	λ_1	Тиск, кПа									λ_s
		1	10	25	50	100	400	600	1000	1500	
700	72,4	79,9									93,4
750	76,7	80,5									100,2
800	80,9	83,0	98,8								106,4
850	85,1	86,4	96,1	108,4							111,9
900	89,4	90,1	96,3	104,7	115,2						116,7
950	93,6	94,1	98,1	103,9	111,7						121,0
1000	97,9	98,2	100,9	104,9	110,5	119,1					124,8
1050	102,1	102,4	104,2	107,0	111,1	117,7					128,3
1100	106,4	106,5	107,8	109,8	112,8	117,9					131,4
1150	110,6	110,8	111,6	113,1	115,3	119,1	132,6				134,3
1200	114,9	115,0	115,6	116,7	118,3	121,2	132,3	136,3			137,0
1250	119,1	119,2	119,7	120,4	121,7	123,9	132,9	136,5			139,5
1300	123,4	123,4	123,8	124,4	125,3	127,0	134,3	137,4	141,2		142,0
1350	127,6	127,7	127,9	128,4	129,1	130,4	136,3	139,0	142,4		144,7
1400	131,9	131,9	132,1	132,5	133,0	134,0	138,8	141,0	144,0	146,1	147,1
1450	136,1	136,2	136,3	136,6	137,0	137,8	141,5	143,3	145,8	147,7	149,2
1500	140,4	140,4	140,5	140,7	141,0	141,6	144,5	146,0	148,1	149,7	151,5
1550	144,6	144,7	144,7	144,9	145,1	145,6	147,9	149,0	150,7	152,1	153,8
1600	148,9	148,9	149,0	149,1	149,3	149,6	151,4	152,3	153,7	154,8	156,2
1650	153,1	153,2	153,2	153,3	153,4	153,7	155,1	155,8	156,9	157,8	158,7
1700	157,4	157,4	157,4	157,5	157,6	157,8	158,8	159,4	160,2	160,9	161,2
1750	161,6	161,7	161,7	161,7	161,8	161,9	162,7	163,1	163,7	164,2	163,7
1800	165,9	165,9	165,9	166,0	166,0	166,1	166,7	166,9	167,4	167,7	166,3
1850	170,1	170,2	170,2	170,2	170,2	170,3	170,7	170,9	171,1	171,3	169,1
1900	174,4	174,4	174,4	174,4	174,4	174,5	174,7	174,8	175,0	175,0	171,9
1950	178,6	178,7	178,7	178,7	178,7	178,7	178,8	178,8	178,9	178,8	174,7
2000	182,9	182,9	182,9	182,9	182,9	182,9	182,9	182,9	182,8	182,7	177,7

Висновки: Отримані на основі експериментальних даних перерізи зіткнень добре узгоджуються з літературними даними, мають достатньо високу надійність і точність, тому розроблені на їх основі розрахункові рівняння та таблиці для в'язкості і теплопровідності цезію і рубідію в газовій фазі можна рекомендувати для практичного використання в інженерних та наукових розрахунках.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ:

1. Гиршфельдер Дж., Кертисс Ч., Берд Р. Молекулярная теория газов и жидкостей / Пер. с англ. - М.: Инстр.лит., 1961.-929 с.
2. Vargaftik N. B., Jargin V.S. Thermal conductivity and viscosity of the gaseous phase// Handbook of Thermodynamic and Transport Properties of Alkali Metals/ Ed.R/ Ohse.-Oxford. 1985. P.785-842.
3. Яргин В.С. Исследование процессов переноса в диссоциированных парах щелочных металлов. Дис. ... д-ра техн.наук (специальность 01.04.14). М.МАИ-1982. - 288 с.
4. Долгов В.И. Экспериментальное и теоретическое исследование вязкости лития в газовой фазе. Дисс. ... канд. физ-мат. наук. -М.: МАИ. 1983.-250с.
5. Степаненко И.Ф. и др. Установка для измерения вязкости паров щелочных металлов при высоких температурах // Измерительная техника. 1987, №8, с.62-.
6. Степаненко И.Ф. Экспериментальное исследование и разработка таблиц вязкости лития и натрия в газовой фазе. Дисс. ... канд.тех.наук. М.: МАИ, 1988.-127с.
7. Варгафтик Н.Б., Керженцев В. В. Экспериментальное исследование теплопроводности пара цезия. -ТВТ. 1973. т.10. №1. с. 59-65.
8. Виноградов Ю. К. Экспериментальное изучение температурной зависимости теплопроводности паров цезия. - М.: МАИ. 1982. 16 с. Деп. ВИНТИ №5064-82.
9. Тимрот Д. Л., Махров В. В., Свириденко В. И., Реутов Б. Ф. Экспериментальное исследование теплопроводности паров цезия. - ТВТ. 1976. т.14. №1. с. 67-74.
10. Заркова Л. П., Стефанов Б. И. Экспериментальное определение коэффициента теплопроводности цезиевой плазмы. Докл. на Междунар. симпоз. по свойствам и приложению низкотемпературной плазмы при XX Междунар. конгр. по теоретической и прикладной химии. М. 1965. с. 239-247.
11. Сидоров Н. И., Тарлаков Ю. В., Яргин В. С. Результаты экспериментального исследования вязкости паров рубидия и цезия. - Изв. вузов. Энергетика. 1975. №4. с. 96-101.
12. Тимрот Д. Л., Махров В. В., Реутов Б. Ф. Экспериментальные исследования теплопроводности паров рубидия. ТВТ. 1978. Т.16. №5. с. 943-945.
13. Варгафтик Н. Б., Студников Е. Л. Экспериментальное исследование теплопроводности паров рубидия. Теплоэнергетика. 1972. №2. с. 81-83.
14. Lee D.I., Bonilla C.F. Viscosity of the Alkali Metal Vapors. Part 1. Cesium up to 5 bars and 1000 °C.- Alkali Metals Int. Symposium. Nottingham , 1966, Spec. Pub. №22 , 1967. P. 53-74.
15. Vargaftik, N. B., Vinogradov, Y. K., Dolgov, V. I., Dzis, V. G., Stepanenko, I. F., Yakimovich, Y. K., and Yargin, V. S., "Viscosity and Thermal Conductivity of Alkali Metal Vapors at Temperatures up to 2000 K," International Journal of Thermophysics, Vol. 12, No. 1, 1991, pp. 85-103.
16. Дзись В. Г., Степаненко И. Ф., Яргин В. С. Экспериментальное исследование вязкости цезия и рубидия в газовой фазе при высоких температурах /М.: МАИ. 1989. 38 с. Деп. ВИНТИ № 4206-В90.
17. Виноградов Ю. К., Степанов В. Г. Измерение теплопроводности паров рубидия при температурах до 1700 К. / М.: МАИ. 1990. 36 с. Деп. ВИНТИ №5114-В90.
18. Виноградов Ю. К. Разработка нестационарных методов исследования теплопроводности газов и измерение теплопроводности перспективных газовых теплоносителей. Автореферат дис. ... д-ра. т.н. М.: МЭИ. 1990. 34 с.
19. Варгафтик Н. Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. - М.: Наука. 1972. 726 с.
20. Дзись В.Г. Экспериментальне дослідження в'язкості рубідію і цезію в газовій фазі. Монографія. – Вінниця: Видавництво ВНАУ, 2014. – 135 с.
21. Дзись В.Г. Экспериментальное исследование вязкости и разработка таблиц коэффициентов переноса цезия и рубидия в газовой фазе. Автореферат дис. ... канд. техн. наук. М.: МЭИ. 1990. 20 с.
22. Литий, натрий, калий, рубидий, цезий. Давление насыщенных паров при высоких температурах / А.Г. Мозговой, В.В. Рошупкин, М.А. Покрасин и др. ГСССД 12-87 / Госкомитет СССР по стандартам. - М.: Изд-во стандартов, 1988. - 38 с.
23. Federico Bariselli, Aldo Frezzotti, Annick Hubin, Thierry E Magin. Aerothermodynamic modelling of meteor entry flows// *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Volume 492, Issue 2, February 2020, P. 2308-2325.
24. Селиванов М.Н., Фридман А.Э., Кудряшова Ж.Ф. Качество измерений. Метрологическая справочная книга. Л.: Лениздат, 1987. - 295 с.
25. Lee D.I., Bonilla C.F. The viscosity of the Alkali Metal Vapors.- Nucl End. and Design, 1968, №5 P. 455-469.
26. Ю. К. Виноградов. Теплопроводность диссоциированных паров рубидия при температурах до 2000 К, ТВТ, 1992, том 30, выпуск 1, С. 63-68
27. Щелочные металлы. Коэффициенты динамической вязкости и теплопроводности в газовой фазе / Варгафтик Н.Б., Яргин В.С., Сидоров Н.И. и др.; ГСССД P72-84. - М.: ГСССД, 1984, - 56 с.