

Технічні науки

УДК 697.27:621.365

Фіалко Наталія Михайлівна

*доктор технічних наук, професор,
член-кореспондент НАН України, завідувач відділу
Інститут технічної теплофізики НАН України*

Fialko Nataliia

*Doctor of Technical Sciences, Professor,
Corresponding Member of the NAS of Ukraine, Head of Department
Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine*

Тимченко Микола Петрович

*кандидат технічних наук, старший науковий співробітник
Інститут технічної теплофізики НАН України*

Tymchenko Mykola

*Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher
Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine*

Меранова Наталія Олегівна

*кандидат технічних наук, старший науковий співробітник,
провідний науковий співробітник
Інститут технічної теплофізики НАН України*

Meranova Nataliia

*Candidate of Technical Sciences (PhD),
Senior Scientific Researcher, Leading Researcher
Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine*

**АНАЛІЗ РОЗВИТКУ УЯВЛЕНЬ ЩОДО ФІЗИЧНИХ АСПЕКТІВ
ЗМІНИ КЛІМАТУ**

ANALYSIS OF THE DEVELOPMENT OF IDEAS ABOUT THE PHYSICAL ASPECTS OF CLIMATE CHANGE

Анотація. Представлено результати аналізу низки досліджень, що слугували розробці фізичних основ зміни клімату. Наведено відповідні дані, починаючи від пріоритетних досліджень парникового ефекту до появи математичних моделей кліматичної системи Землі.

Ключові слова: кліматична безпека, фізичні основи зміни клімату, кліматична система Землі, глобальне потепління.

Summary. The results of analysis of research that served to develop the physical foundations of climate change are presented. Relevant data are presented, ranging from priority studies of the greenhouse effect to the emergence of mathematical models of the Earth's climate system.

Key words: climate security, physical basis of climate change, Earth's climate system, global warming

Вступ. В зв'язку з тим, що кліматичні зміни досягли передкритичного стану, питання кліматичної безпеки потребують особливої уваги [1-6]. Набуває актуальності поглиблений аналіз цієї проблеми. Важливим, зокрема, є аналіз особливостей теплофізичних аспектів концепції зміни клімату.

Мета роботи полягає у аналізі особливостей розвитку теплофізичних основ концепції зміни клімату.

Викладення основного матеріалу. Системні дослідження зміни клімату в форматі глобального потепління розпочалися в 90-х роках 20-го століття. Однак глибокі дослідження фізичних основ зміни клімату нараховують близько 200 років.

Аналіз змісту цих основ є предметом окремої роботи. В даній статті коротко розглядаються результати лише деяких досліджень, що слугували їх розробці.

Пріоритет у дослідженні парникового ефекту належить Ж.Б. Фур'є. Ним була запропонована перша радіаційна модель даного ефекту і використано поняття «темної теплоти» (1824 р.). В основу моделі покладено гіпотезу про особливу роль атмосфери Землі як своєрідної скляної оболонки в теплиці, що пропускає сонячне випромінювання, затримуючи власне. Слід зазначити, що модель парникового ефекту Фур'є розроблялася задовго до відкриття оптичних властивостей атмосферних газів, а відтак вказана гіпотеза була вельми вдалою здогадкою.

Суттєво пізніше було встановлено здатність деяких газів, зокрема CO_2 , поглинати ІЧ-випромінювання та узагальнено цей ефект у планетарному масштабі. (Д. Тіндаль, 1859 р.). Тобто було доведено здатність CO_2 (на відміну від інших відомих на той час компонентів атмосфери O_2 і N_2 , вміст яких в ній становить 99,3%) затримувати тепло ІЧ-випромінювання з його накопиченням в атмосфері та приповерхневих шарах Землі.

Подальше поглиблення уявлень щодо ролі атмосферного CO_2 у планетарному потеплінні пов'язано з роботами С. Арреніуса (1896 р.) Тут на особливу увагу заслуговує та обставина, що у цих роботах йдеться про атмосферний CO_2 антропогенного походження від спалювання вуглецевмісних палив. При цьому зростання його вмісту розглядається в контексті ефекту потепління.

Заслуга опрацювання великих масивів емпіричних даних щодо змін клімату суші протягом значного періоду (близько 50 років) на тлі зростання рівня атмосферного CO_2 належить Г. Каллендеру (1938 р.) Вказані узагальнення можна вважати початком світового дискурсу щодо наявності

відповідного причинно-наслідкового зв'язку впливу CO₂ і глобального потепління.

Важливий етап у дослідженні глобального потепління пов'язаний із систематичними прецизійними безперервними вимірюваннями вмісту атмосферного CO₂ і інших парникових газів, що розпочалися у 1958 р. Засновником даного напрямку досліджень і надалі його визначним лідером був Ч. Кілінг. Успішність цих досліджень значною мірою визначалася застосуванням запропонованого ним підходу, що включав нову методику організації і проведення вимірювань, використання відповідного приладного забезпечення тощо. За результатами виконаних узагальнень було встановлено факт монотонного зростання у часі рівня CO₂ із сезонною і навіть добовою амплітудною модуляцією. Заснований Ч. Кілінгом центр вимірювання вмісту парникових газів при обсерваторії Мауна-Лоа, Гаваї, дотепер залишається провідним науковим осередком за даним напрямком досліджень.

Потреба в оцінках стану кліматичної системи Землі, прогнозах його змін тощо зумовила появу і подальший розвиток відповідних кліматичних моделей. Ці моделі постійно ускладнюються, стають все більш точними і адекватними. Значний внесок у розробку таких моделей здійснено Сюкуро Манабе. Перша побудована ним спрощена модель клімату Землі стала важливим кроком у подальшій розробці відповідних складних фізичних моделей (60-ті роки минулого століття). У запропонованій моделі враховувалась сумісна дія сонячного випромінювання і вертикального переміщення повітряних мас в атмосфері Землі. Розрахунки за моделями, розробленими Манабе, показали, що підвищення рівня діоксиду вуглецю призводить до зростання температури приземної атмосфери.

З ім'ям Клауса Хассельманна пов'язані досягнення у фізичному моделюванні клімату Землі, що стосуються достовірності і надійності кліматичних моделей. Ним, зокрема, було запропоновано метод

моделювання кліматичних процесів з врахуванням різних кліматоутворюючих факторів тощо.

Сюкуро Манабе і Клаус Хассельманн за роботи, присвячені моделюванню змін клімату Землі, у 2021 р. отримали Нобелівську премію з фізики.

Про важливість для світової спільноти дослідження різних аспектів кліматичних змін свідчить, зокрема, факт отримання у 2018 р. Нобелівської премії з економіки Вільямом Нордхаусом. Ним розроблена перша інтегрована модель, в якій поєднані економічні і кліматичні показники, що відображають зв'язок економічного зростання з викидами вуглецю та глобальним потеплінням.

Слід відзначити визначний внесок у моделювання клімату Землі та вуглецевого циклу провідних світових експертів зі зміни клімату Дж. Хансена, Т. Уїглі, К. Емануеля та К. Калдейра. Їм належить пріоритет обґрунтованого прогнозу про початок сучасного глобального потепління, отриманого на основі моделювання (межа 20-21 століття).

На сьогодні кліматичні моделі є єдиним надійним інструментом прогнозування змін клімату Землі. Сучасна тенденція їх побудови полягає, насамперед, у врахуванні різних міжсистемних зв'язків. Найсучасніші кліматичні моделі (моделі шостої фази порівняння об'єднаних моделей, Coupled Model Intercomparison Project Phase 6) наводяться в оціночній доповіді (AR6).

Висновки. Виконано аналіз досліджень, присвячених побудові теплофізичних основ зміни клімату. Розглянуто роботи, починаючи від формування уявлень про парниковий ефект у часи створення термодинаміки і теорії теплоти до сучасних досліджень з прогнозування змін клімату на основі математичного моделювання.

Література

1. von Schuckmann K., Minière A., Gues F et al. Heat stored in the Earth system 1960–2020: where does the energy go? *Earth System Science Data*. 2023. 15. P. 1675–1709. doi: <https://doi.org/10.5194/essd-15-1675-2023>.
2. Gulev S.K., Thorne P.W., Ahn J. et al. Changing State of the Climate System. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the IPCC* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani et al, (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2021. P. 287–422, doi: 10.1017/9781009157896.004.
3. Friedlingstein P., O'Sullivan M., Jones M. W. et al. Global Carbon Budget. *Earth System Science Data*. 2022. 14. P. 4811–4900. doi: <https://doi.org/10.5194/essd-14-4811-2022>.
4. IPCC AR6, 2023: *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, P. 35-115, doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.
5. Forster P. M., Christopher J. S., Walsh T. et al., Indicators of Global Climate Change 2022: annual update of large-scale indicators of the state of the climate system and human influence. *Earth System Science Data*. 2023. Vol. 15, Is. 6. P. 2295-2327. doi: <https://doi.org/10.5194/essd-15-2295-2023>.
6. Халатов А., Фіалко Н., Тимченко М. Енергокліматична безпека і енергозабезпечення житлового сектору. *Теплофізика та теплоенергетика*. 2023. 48(1). С. 20-27.