

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ГАЗУ НАН УКРАЇНИ

**Розробка наукових засад виробництва і використання нанорідин для
підвищення безпеки та ефективності енергетичного обладнання,
зокрема ядерних реакторів**

РЕФЕРАТ

КИЇВ 2022

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Інтенсифікація процесів теплообміну є однією з нагальних проблем сучасної промисловості та енергетики (ядерна енергетика, ракетобудування, електроніка, лазерні випромінювачі, та ін.) Метою інтенсифікації теплообміну є не тільки підвищення ефективності технологій але й запобігання аварійних ситуацій. Випадки аварійного перегріву обладнання мають місце в таких галузях як металургія, хімічна промисловість, транспорт, ядерна енергетика та інші. Тому розробки з інтенсифікації процесів теплообміну. є важливою науково-технічною задачею.

Одним з лімітуючих факторів інтенсифікації теплообміну є так званий "критичний тепловий потік" (КТП) – межа переходу від бульбашкового до плівкового кипіння що супроводжується не тільки зниженням інтенсивності теплообміну але й різким підвищенням температури поверхні теплообміну аж до її руйнування (розплавлення, *burnout*, англ.).

В останні два десятиріччя значна увага приділялася дисперсіям наночасточок у базовій рідині (в якості яких зазвичай використовуються традиційні теплоносії), які отримали назву *нанорідини*. Численні експерименти показали, що в таких штучно створених системах значно (до 200-300 %) зростає величина критичного теплового потоку (q_{cr}), а інтенсивність тепловіддачі (α_{max}) при кипінні більша порівняно з базовими рідинами. Це робить багатообіцяючим застосування нанорідин (НР) як теплоносія в системах безпеки важливих наукових та промислових об'єктів.

Надійного пояснення механізму зростання критичного теплового потоку в нанорідинах наразі немає, в даних щодо теплообміну при кипінні нанорідин наявні деякі протиріччя у різних дослідників.

Щодо теплофізичних властивостей нанорідин теж немає однозначних тверджень та висновків. Так, теоретичний аналіз механізму зростання теплопровідності в нанорідинах ускладнений через відхилення їх поведінки від класичної моделі Максвелла, яка описує теплопровідність суспензії

мікрочастинок. Не менш важливою властивістю теплоносіїв є їх в'язкість. У більшості доступних публікацій, де вимірювалася в'язкість нанорідин, ця властивість аномально зростає зі збільшенням концентрації наночастинок. Даних щодо інших теплофізичних властивостей нанорідин, таких як густина, поверхневий натяг, теплоємність у літературних джерелах порівняно мало. Відомі на цей час НР створювалися на основі металевих або металлооксидних наночастинок. Між тим, існують інші перспективні наноматеріали, наприклад, на основі вуглецю і наносилікатів, на основі яких слід створити і дослідити нові НР.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами

Дисертаційна робота виконана за відомчою тематикою Інституту газу НАН України в рамках науково-дослідної роботи «Розробка наукових засад виробництва і використання нанорідин для підвищення безпеки та ефективності енергетичного обладнання, зокрема ядерних реакторів» (Цільова програма наукових досліджень Відділення фізико-технічних проблем енергетики НАН України «Фундаментальні дослідження процесів перетворення та використання енергії» на 2017-2021 рр.), № держ. реєстрації 0117U002299 та науково-дослідної роботи «Синтез стабільних нанорідин для енергоефективних теплообмінних систем енергетики, транспорту та промисловості» (Цільова комплексна програма фундаментальних досліджень НАН України «Фундаментальні проблеми створення нових наноматеріалів і нанотехнологій» на 2015-2019 рр.) № держ. реєстрації 0115U005087.

Мета і завдання дослідження.

Метою роботи є розробка нових НР, вивчення і узагальнення їх теплофізичних характеристик, а також підвищення ефективності процесу теплообміну при кипінні, експериментальне дослідження критичних теплових потоків та механізму теплообміну при кипінні.

Задачами роботи є:

- 1) Розробка складу і технологій одержання нових НР та випробування їх у якості теплоносіїв;

2) дослідження впливу складу, розміру, структури і концентрації дисперсної фази, а також ступеня дезагрегації та вмісту диспергента на параметри кипіння і теплообміну НР;

3) визначення оптимального складу НР, методу їх підготовки, та можливих напрямів практичного використання.

Об'єкт дослідження – процеси кипіння НР і їх теплофізичні параметри; процеси диспергування та стабілізації нанорідин.

Предмет дослідження – криза кипіння та криза тепловіддачі при кипінні НР, теплофізичні властивості НР.

Методи дослідження – у роботі застосовані методи експериментального теплофізичного моделювання, фізичного та хімічного аналізу, математичного моделювання, та статистики.

Наукова новизна отриманих результатів:

- Поставлена і вперше вирішена задача створення НР на основі українських природних алюмосилікатів для використання в якості теплоносіїв при кипінні. Доведена доцільність їх використання в якості НР для охолодження перегрітих поверхонь теплообміну.
- Запропоновані і вперше в світі створені композитні НР, які забезпечують одержання найбільших КТП серед відомих на сьогодні НР.
- Запропоновані фізична модель кипіння НР та математична модель розподілу температур в циліндричному стержні. На основі цих моделей створено алгоритм автоматизованого управління, який було використано при створенні комп'ютеризованої установки для дослідження теплообміну при кипінні НР.
- На даній установці отримано криві кипіння і значення коефіцієнтів тепловіддачі для широкого спектра розроблених НР. Дослідженнями для більшості НР виявлено відсутність явища «раптової» кризи кипіння. Це виражається у зменшенні зв'язку між зниженням коефіцієнту тепловіддачі та питомого теплового потоку при кипінні. В зв'язку з цим введено окреме поняття – "кризове явище" при кипінні НР.

- Досліджено вплив різних чинників (природи і концентрації твердої фази, форми і анізотрії частинок, добавок диспергенту, ПАР і електролітів, стану поверхні нагрівання) на значення критичного теплового потоку при кипінні НР. Встановлено, що величини КТП і максимально досяжного питомого теплового потоку при кипінні алюмосилікатних НР тим вище, чим більше коефіцієнт анізотрії наночастинок. Це пояснюється тим, що в результаті відкладення НЧ при кипінні НР з сильно анізотричними частинками, поверхня нагрівача набуває більш пористий і шорсткий характер, а шорсткість та пористість різко підвищують площу поверхні теплообміну і кількість центрів пароутворення.
- Виявлено, що НР на основі атапульгіту більш стабільні до тривалих і багаторазових циклів кипіння-охолодження і до коагулюючого впливу постійного струму в порівнянні з НР на основі монтморилоніту, що пояснюється відмінністю їхнього складу та кристалічною будовою.
 - Встановлено, що хімічна природа наночасточок робить істотний вплив на величину критичного теплового потоку (q_{cr}) нанофлюїда. Для нанорідин на основі вуглецю і алюмосилікатів виявлено майже дворазове підвищення величини q_{cr} в порівнянні з базовою рідиною (дистильована вода). У той же час, існуючі теорії пророкують підвищення q_{cr} для різних нанофлюїдів тільки на 15-20%..
 - Доведено здатність НР до охолодження перегрітих поверхонь теплообміну, які вже знаходяться в режимі плівкового кипіння. В результаті спостерігається перехід від плівкового до бульбашкового режиму кипіння і відповідно відбувається зниження температури поверхні нагріву до прийнятних значень 130-140 °С. Це є фізичним моделюванням можливості попередження розплавлення корпусу ядерного реактора. **Практичне значення отриманих результатів** - Високі теплові параметри і стабільність до кипіння алюмосилікатних НР роблять їх перспективними теплоносіями для енергетики, а також засобами аварійного охолодження, зокрема для корпусів ядерних реакторів.

Особистий внесок здобувача: проведено літературний огляд, розроблено обладнання для автоматизованих теплофізичних експериментів, методику дослідження та ідентифікації різних періодів кризи кипіння, проведено всі досліди по кипінню НР, узагальнено отримані результати, запропоновано та досліджено використання НР у якості теплоносія для екстреного охолодження перегрітих поверхонь.

Перелік наукових публікацій претендента, які увійшли до роботи

- 1). Bondarenko B.I., Moraru V.N., Sydorenko S.V., Komysh D.V., Khovavko A.I, Gudkov N.N. Nanofluids for emergency cooling of overheated surfaces of power equipment. // European Commission funded International Workshop “Materials resistant to extreme conditions for future energy systems”. 12-14 June 2017, Kyiv – Ukraine. P. 37. ISSN 1831-9424 ISSN 1831-9424, doi: 10.2760/991754.
- 2). Морару В.Н. Механизм повышения и количественная оценка удельного теплового потока при кипении наножидкостей в условиях свободной конвекции. // Энерготехнологии и Ресурсосбережение, 2017, №3, с. 25-34.
- 3). V.N. Moraru. Stable Nanofluids for Efficient Heat Exchange Systems for Energy, Transport and Industry, Proceeding of Advances in Functional Materials Conference 2017, Aug 14-17, 2017, University of California, Los Angeles, USA, Abstract ID:AFM-17-0EA78 -0644360212:
- 4) Б.И. Бондаренко, В.Н.Морару, С.В.Сидоренко, Д.В. Комыш, Н.Н. Гудков "Невероятный эффект скорости подъема тепловой нагрузки на удельный тепловой поток при кипении некоторых наножидкостей // Письма в ПЖТФ,2018, том 44, вып. 11, с.11-20.DOI: 10.21883/0000000000.
- 5) B.I. Bondarenko, V.N. Moraru, S.V. Sidorenko, D.V. Komysh, and N.N. Gudkov.”Incredible effect of heat load increase rate on specific heat flux at some nanofluids boiling”// Technical Physics Letters,2018, Vol. 44, No. 6, pp. 461–464. DOI: 10.1134/S1063785018060032

6) Borys Bondarenko, Vasyl Moraru, Dmytro Komysch, and Sergey Sidorenko Nanofluids for Power Industry //BITs 7-th Annual World Congress of Advanced Materials-2018 Conference Handbook, Section 6: Novel Nanomaterials. Focus 601: Nanotubes, Nanowires, Nanofibers, Nanorods and Nanobelts, September 13-15, 2018, Xiamen, China, p.173

7). B. Bondarenko, V. Moraru, S. Sydorenko, D. Komysch and N. Gudkov. Emergency cooling of superheated heat exchange surfaces with nanofluids under various conditions of heat load supply // ICNF-19 INTERNATIONAL CONFERENCE PROCEEDINGS, Presentation No.: 533521, 1st International Conference on Nanofluids (ICNf), 2nd European Symposium on Nanofluids (ESNf), 26-28 June 2019, Castelló, Spain.

8) B. Bondarenko, V. Moraru, S. Sydorenko, D. Komysch and N. Gudkov. Nanofluids for Emergency Cooling of Overheated Surfaces of Power Equipment. //Proceed.of theNanotech France Conference 2019, Advanced Nanomaterials,Nanofluids, (26-28 June 2019, Paris- France).

9) В.Н. Морару , Б.И. Бондаренко, С.В. Сидоренко, Д.В. Комыш. Наножидкости для энергетики: механизм влияния диспергентов на тепловые параметры и кризисные явления при кипении // Журнал технической физики, 2020, том 90, вып. 2, с. 175 - 184.

10). V. N. Moraru, B. I. Bondarenko, S. V. Sidorenko, and D. V. Komysch Nanofluids for Power Engineering: The Mechanism of the Influence of Dispersing Agents on the Thermal Parameters and Crisis Phenomena during Boiling //ISSN 1063-7842, Technical Physics, 2020, Vol. 65, No. 2, pp. 163–173. © Pleiades Publishing, Ltd., 2020.

17). B.I. Bondarenko, V.N. Moraru, V.Yu. Kravetz, and D.I. Gurov. Nanofluids based on diamond and carbon nanotubes – as promising heat carriers for electronics cooling //Abstract of the 31st International Conference on Diamond and Carbon Materials (DCM 2020), Melia Palma Bay and Palau de Congressos de Palma, 13-17 September 2020, Palma, Mallorca, SPAIN.

<https://app.oxfordabstracts.com/stages/1607/submissions/186810/form/view>

18). Bondarenko B., Moraru V., Sydorenko S., Komysch D., Kravets V. APPLICATIONS OF NANOFLUIDS FOR EMERGENCY COOLING OF OVERHEATED SURFACES OF POWER EQUIPMENT AND ELECTRONICS.

BOOK of ABSTRACTS: I-st International Research and Practice Conference “Nanoobjects & Nanostructuring”, September 20–23, 2020, Lviv, Ukraine, page 104. ISBN 978-617-7546-11-4:

19). B.I. Bondarenko, V.N. Moraru, V.Yu. Kravetz, S.V. Sydorenko, D.V. Komysch. Stable nanofluids for emergency cooling of overheated surfaces of power equipment and electronics // Preprint on Research Gate Portal, Borys Bondarenko's Lab, March 2020.

20). Vasyl Moraru, Boris Bondarenko, Sergey Sydorenko, Dmytro Komysch, "Emergency cooling of superheated surfaces by nanofluids additives in the event of a water boiling crisis", International Journal of Heat and Mass Transfer, 2021, Vol. 169 (№4), 120932.

21). Vasyl Moraru, Dmytro Komysch, Mykola Sydorenko, Serhiy Sydorenko, Nanofluids for energetics: Emergency cooling of overheated objects by nanofluids. // 2021, IEEE – 11-th Internat. Conference on Nanomaterials Applications & Properties (NAP-2021), Odesa, Ukraine, Sept.5-11, 2021, p.114.