



УДК 536.22/.23; 621.039

Б.И. БОНДАРЕНКО, академик НАНУ, докт. техн. наук, профессор,

В.Н. МОРАРУ, канд. техн. наук, старший научный сотрудник,

С.В. СИДОРЕНКО, канд. техн. наук, старший научный сотрудник,

А.М. СВЯТЕНКО, канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник,

А.П. КОЖАН, канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник,

А.И. ХОВАВКО, канд. техн. наук, старший научный сотрудник, **Д.В. КОМЫШ**, младший научный сотрудник,

А.В. СНИГУР, научный сотрудник, **Н.В. ВОЛКОВ**, младший научный сотрудник

Институт газа НАН Украины (ИГ НАНУ), г. Киев

ИССЛЕДОВАНИЯ ПО СОЗДАНИЮ НАНОЖИДКОСТЕЙ ДЛЯ ЭНЕРГЕТИКИ

Композиционные смеси жидкостей с небольшими добавками наночастиц получили название наножидкости. С 2010 г. в Институте газа Национальной академии наук Украины ведутся работы по созданию устойчивых наножидкостей, пригодных для использования в теплотехнике и энергетике. Были выполнены исследования критических тепловых потоков и коэффициентов теплоотдачи при кипении различных наножидкостей на основе водных дисперсий, содержащих углерод и природные алюмосиликаты. Полученные результаты свидетельствуют о существенном повышении (в 2–3 раза) критических тепловых потоков при кипении созданных стабилизированных нанодисперсий.

Ключевые слова: наножидкости, критический тепловой поток, кипение, ядерная энергетика.

Интенсификация процессов теплообмена – одна из важнейших проблем современной промышленности и энергетики. Во многих технологиях, машинах, оборудовании (к примеру, в ядерных реакторах, лазерных излучателях, электронных приборах) возникает потребность интенсивного отвода тепла. Один из путей решения этой проблемы – использование в качестве теплоносителей наножидкостей (НЖ), способных работать при высоких удельных тепловых потоках. Неслучайно в последние десятилетия им стали уделять повышенное внимание.

Как показали многочисленные эксперименты, в таких искусственно созданных системах значительно возрастает величина критического теплового потока (КТП). При этом увеличивается и интенсивность теплоотдачи по сравнению с базовыми жидкостями [1], что делает многообещающим использование НЖ в качестве хладагентов в системах безопасности важных промышленных объектов, к которым относятся и металлургические предприятия, где замена обычных теплоносителей наножидкостями может обеспечить существенные выгоды. Во-первых, их использование позволяет значительно сократить выбросы углекислого газа в атмосферу. Во-вторых, предприятия, которые внедряют нанотехнологию охлаждения электронного оборудования, уменьшат затраты на эти цели благодаря гораздо более эффективному отводу

тепла и, как следствие, уменьшению громоздкости и материалоемкости технологической схемы, а также снижению расхода энергии. При более низких температурах надежнее будет функционировать любое оборудование, для охлаждения которого в качестве хладагентов будут использоваться наночастицы. Снижение температуры стенок теплообменного оборудования уменьшит температуру отходящих газов, что является важным экологическим аспектом защиты атмосферы.

Между тем надежного объяснения роста интенсивности теплоотдачи при кипении наножидкостей пока не найдено, причем полученные результаты носят противоречивый характер.

Экспериментальные исследования свидетельствуют о том, что даже незначительные объемные концентрации наночастиц в воде (0,001–0,1 % об.) приводят к существенному повышению КТП. При этом теплофизические свойства воды с наночастицами (поверхностное натяжение, теплопроводность, вязкость), согласно публикациям [2, 3], мало отличаются от свойств дистиллированной воды.

Широкое использование процессов кипения и испарительного охлаждения объясняется высокими коэффициентами теплоотдачи (2–50 тыс. Вт/м²К) [4, 5] (теплоотдача при конвективном теплообмене гораздо менее

интенсивна). Основным препятствием на пути дальнейшей интенсификации теплообмена при кипении жидкостей и растворов является переход от пузырькового режима кипения к пленочному, сопровождающийся резким уменьшением коэффициента теплоотдачи и быстрым возрастанием температуры нагревателя. При этом плотность теплового потока, который отводится такой кипящей жидкостью от поверхности теплообмена, ограничена величиной КТП. Повышения КТП можно достичь, используя в качестве теплоносителя водные дисперсии наночастиц разного химического состава (например, ZrO_2 , SiO_2 , Al_2O_3 , Cu , C и другие) с варьирующейся объемной концентрацией (0,001–1 % об.).

Во многих работах [6–10] увеличение КТП объясняется изменением состояния поверхности нагрева вследствие отложения на них наночастиц во время процесса кипения. Согласно этой гипотезе, осажденные наночастицы формируют на поверхности нагревательных элементов слой, который характеризуется развитой пористой гидрофильной структурой, благодаря чему обеспечивается более устойчивый приток «холодной» жидкости к поверхности нагрева в пристенный слой и отвод в объем перегретой жидкости, что способствует росту величины КТП [11].

В Институте газа НАН Украины впервые в СНГ начаты системные работы по исследованию наножидко-

стей для определения возможностей их использования в энергетике и смежных областях техники, где требуется существенная интенсификация теплообмена.

В качестве нанодобавок исследовались следующие материалы:

- многостенные углеродные нанотрубки среднего (25–50 нм) и большого (200–350 нм) диаметров, получение которых освоено в Институте газа;
- терморасширенный графит (нанографенит), полупромышленное производство которого налажено в Институте газа;
- природные украинские алюмосиликаты – монтмориллонит и аттапульгит;
- газовая сажа ДГ-100 (Carbon black DG-100).

На рис. 1 представлены изображения нанографенита и углеродных многостенных нанотрубок. Фотографии получены на сканирующем электронном микроскопе. Количество нанодобавок в исследованиях варьировалось в пределах 0,1–2 %.

Отдельной проблемой являлась стабилизация суспензий при условии минимизации пенообразования. Она решалась методами коллоидно-химического материаловедения [12–17].

Для изучения закономерностей изменения теплового потока и коэффициента теплоотдачи в зависимости от температурного напора создан экспериментальный

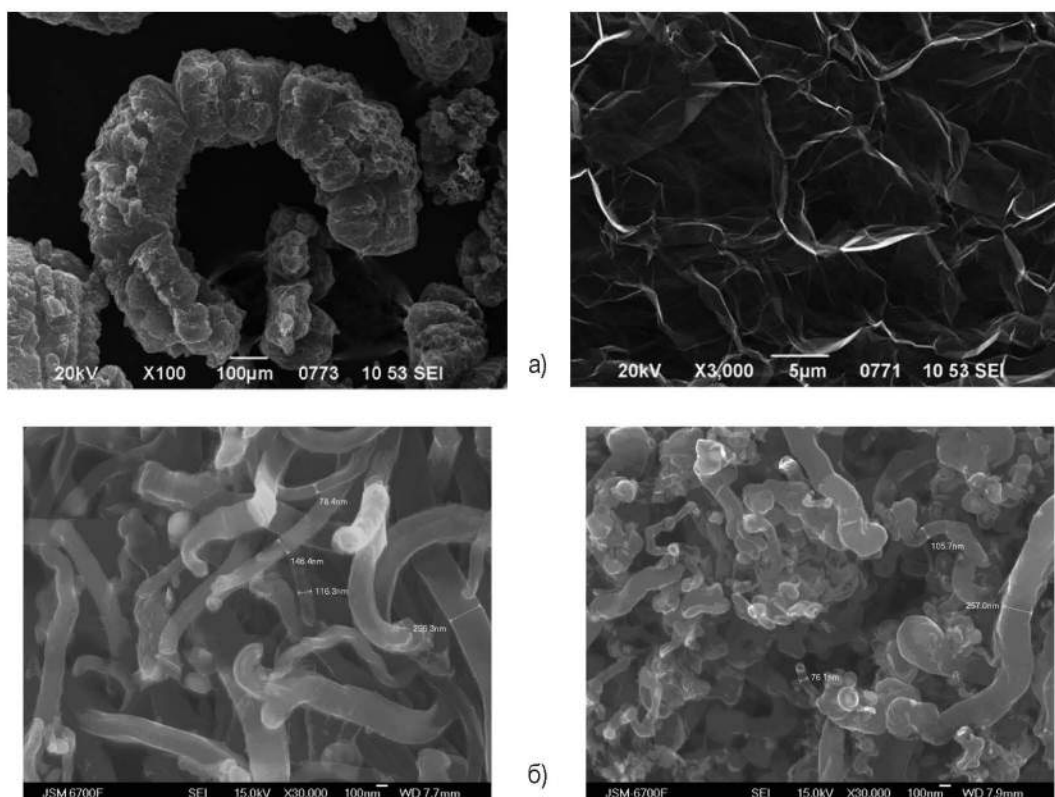


Рисунок 1 – Изображения:

а) нанографенита (ТРГ); б) углеродных многостенных нанотрубок



стенд и разработана методика проведения исследований теплообмена при кипении наножидкостей в условиях свободной и принудительной конвекции с возможностью достижения критических тепловых потоков. Эта методика предусматривает возможность исследования кипения жидкостей на поверхности нагревателя, выполненного в виде нихромовой проволоки диаметром 0,2–0,5 мм и длиной 50–145 мм.

Момент достижения КТП фиксируется визуально и с помощью видеокамеры по образованию паровой пленки на поверхности нагревателя, изменению цвета нагревателя (от серого до ярко-красного), а также по его разрушению (пережогу) при достижении им температуры плавления нихрома.

Поскольку наножидкости на основе углерода непрозрачны, при их кипении невозможно визуально зафиксировать достижение КТП. Для решения этой проблемы разработана программа компьютерного расчета значений удельного теплового потока и коэффициента теплоотдачи по синхронно получаемым значениям параметров процесса кипения в режиме реального времени.

На рис. 2 представлены измерительные ячейки установки по исследованию КТП. Результаты исследований показали возможность повышения КТП наножидкостей в 2–3 раза по сравнению с чистой водой.

Рассмотрим для примера кривые кипения различных наножидкостей на основе аттапульгита (рис. 3).

Величина КТП для особо чистой воды выше, чем для дистиллированной, что объясняется полным отсутствием в ней солей жесткости. При наличии этих солей во время кипения воды на поверхности нагрева образуется слой осадка [18–20], который дополнительно препятствует переносу тепла от нихромового нагревателя к кипящему теплоносителю. Наличие же наночастиц в дисперсии не только изменяет характер кривых кипения воды (базовой жидкости), но и заметно увеличивает величину КТП.

Как видно из рис. 3, по мере роста объемной доли твердой фазы в суспензии увеличивается и значение КТП. Это можно объяснить возникновением пористого слоя наночастиц вокруг нагревателя. Действительно, согласно одной из возможных гипотез, феномен роста КТП

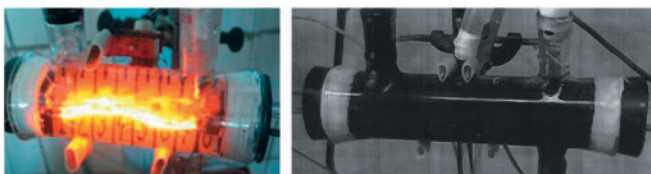


Рисунок 2 – Измерительные ячейки компьютеризированной установки исследования критических тепловых потоков

при кипении наножидкости связан с увеличением количества центров парообразования на пористой поверхности нагрева [19]. Кроме того, по мнению авторов, рост интенсивности теплоотдачи при кипении НЖ обусловлен образованием пористого слоя, по микропорам которого подводится жидкость к нагревателю, а по макропорам отводится пар, образующийся из этой жидкости.

Кризис кипения НЖ, в отличие от однофазных жидкостей [4–5], не имеет резко выраженного проявления. Характер представленных кривых (рис. 3) можно объяснить отложением пористого осадка из наночастиц, которые выполняют двойственную функцию. С одной стороны, это теплоизоляция, которая повышает температуру нагревателя, с другой – пористая структура осадка, повышающая КТП.

Действительно, традиционный метод повышения количества отводимого (или подводимого) тепла в любой теплообменной системе заключается в увеличении как площади поверхности нагревателя (охладителя), так и скорости потока рабочей жидкости. Но в наших экспериментах эти факторы были практически одинаковы для воды и НЖ, откуда можно сделать вывод, что образование пористого слоя из высокодисперсных частиц на поверхности нагревателя, как уже отмечалось, является наиболее вероятной причиной высокой интенсивности теплоотдачи при кипении наножидкости.

Общеизвестен факт, что повышение содержания солей жесткости в воде ухудшает ее теплофизические свойства как теплоносителя. Это говорит о том, что появление плотной накипи на поверхности нагревателя способствует наступлению кризиса кипения при более низ-

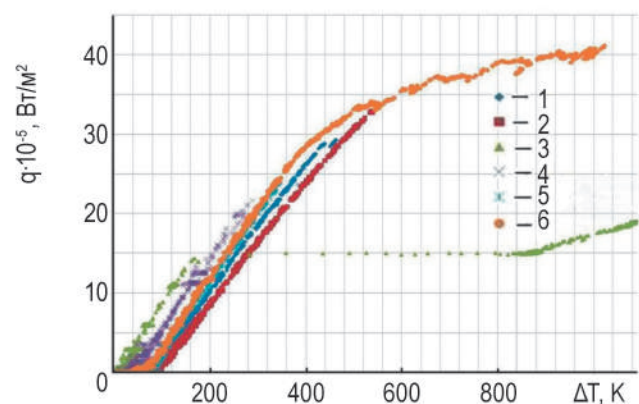


Рисунок 3 – Сравнение кривых кипения для различных жидкостей:

1 – НЖ на основе аттапульгита (1,08 об. %), разбавленная проточной водой; 2 – НЖ на основе аттапульгита (1,76 об. %); 3 – дистиллированная вода; 4 – особо чистая вода; 5 – НЖ на основе аттапульгита (0,605 об. %); 6 – НЖ на основе аттапульгита (1,76 об. %) с применением диспергентов

ких значениях теплового потока и является еще одной веской причиной уменьшения теплоотдачи при кипении теплоносителей, перегрева и выхода из строя теплообменного оборудования. Следовательно, механизм повышения теплоотдачи при кипении наножидкостей связан не только с уменьшением накипеобразования (при использовании диспергентов), но и с изменением структуры, свойств слоя накипи в случае его возникновения. По-видимому, в присутствии наночастиц образуется более пористый и шероховатый слой накипи, обеспечивающий интенсивный теплообмен со средой и препятствующий переходу от пузырькового режима кипения к пленочному.

На рис. 4 приведен пример формирования структурированных нанотложений – «генераторов» образования пузырьков. Изображения получены на сканирующем электронном микроскопе.

На основе изложенных исследований Институтом газа совместно с Институтом безопасности атомных электростанций НАН Украины начаты исследования возможности применения наножидкостей для повышения безопасности работы АЭС. Подобные исследования ведутся в США и Южной Корее, а всемирно известная французская реакторостроительная фирма Areva S.A. с 2008 г. патентует схемы применения наножидкостей в различных контурах ядерных установок (для примера на рис. 5 приведена схема, взятая из патента по предотвращению расплавления корпуса реактора).

В Евросоюзе начаты исследования по применению наножидкостей в химической промышленности (охлаждение реакторов синтеза Фишера-Тропша), на транспорте, в солнечных установках, теплонасосах и т.д.

ВЫВОДЫ

Экспериментальное подтверждение возможности использования наножидкостей в энергетике и смежных отраслях свидетельствует о целесообразности соответствующих фундаментальных и прикладных исследова-

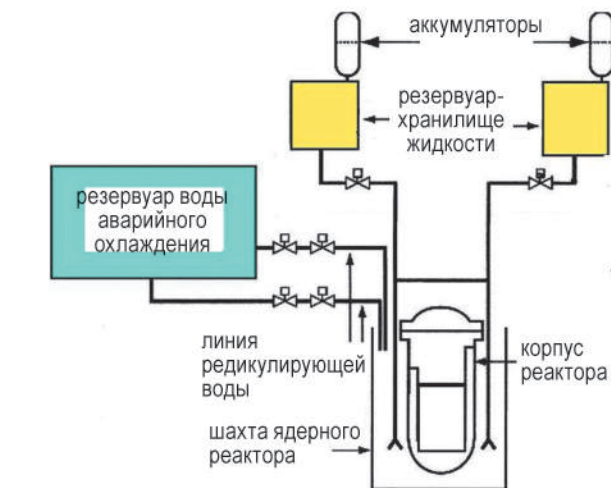
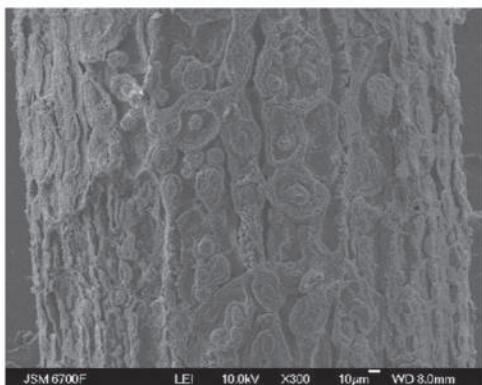


Рисунок 5 – Схема использования наножидкостей для предотвращения расплавления корпуса ядерного реактора (патент Areva S.A.)

ний по их практическому применению, что позволит повысить безопасность эксплуатации оборудования в различных отраслях промышленности.

Главными направлениями исследований в данной области следует считать создание устойчивых НЖ, способных обеспечить функционирование высокотемпературного теплообменного оборудования, а также НЖ, способных эффективно отводить большое количество тепла, что особенно ценно в экстремальных условиях эксплуатации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Xiang-Qi Wang A review on nanofluids – part II: experiments and applications / Xiang-Qi Wang, Arum S. Mujumdar // Brazilian Journal of Chemical Engineering. – 2008. – Vol. 25, № 04. – P. 631–648.
2. Kim, S.J., Truong B., Buongiorno J., Hu. L.W., Bang I.C. // Paper 6005. Proceedings of ICAPP.06. Reno, NV USA, June 4–8, 2006.

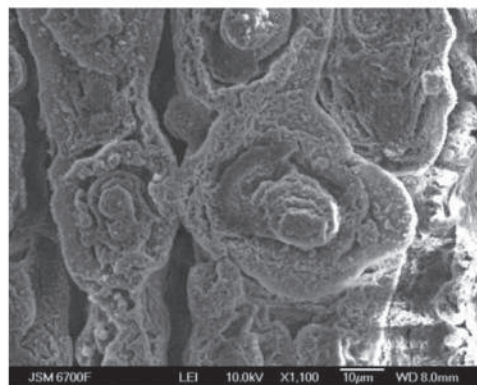


Рисунок 4 – Формирование структурированных нанотложений диоксида титана – «генераторов» образования пузырьков



3. **Kim, S.J., Bang I.C., Buongiorno J., Hu L.W.** // Int. J. Heat and Mass Transfer. – 2007. – V. 50. – P. 4105–4116.
4. **Исаченко, В.П.** Теплопередача : учеб. для вузов / В.П. Исаченко, В.А. Осипова, А.С. Сукомел. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : Энергоиздат, 1981. – 416 с., ил.
5. **Кутателадзе, С.С.** Основы теории теплообмена / С.С. Кутателадзе. – Изд. 5-е перераб. и доп. – М. : Атомиздат, 1979. – 416 с.
6. In Cheol Bang Measurements of key pool boiling parameters in nanofluids for nuclear applications / In Cheol Bang, Jacopo Buongiorno, Lin-Wen Hu, Hsin Wang // Journal of Power and Energy Systems. – 2008. – Vol. 2, № 1. – P. 340–351.
7. **Sung Joong Kim.** Pool Boiling Heat Transfer Characteristics of nanofluids, Thesis (S.M.) – Massachusetts Institute of Technology, Dept. of Nuclear Science and Engineering, (2007).
8. **Фокин, Б.С.** Критический тепловой поток при кипении водной дисперсии наночастиц / Б.С. Фокин, М.Я. Беленький, В.И. Альмяшев, В.Б. Хабенский, О.В. Альмяшева // Письма в ЖТФ. – 2008. – Т. 35, Вып. 10. – С. 1–5.
9. **Kim, S.J.** Study of pool boiling and critical heat flux enhancement in nanofluids / S.J. Kim, I.C. Bang., J. Buongiorno, L.W. Hu // Bulletin of the polish academy of science. Technical Science. – 2007. – Vol. 55. – № 2.
10. **Forrest, E.** Augmentation of nucleate boiling heat transfer and critical heat flux using nanoparticle thin-film coatings / E. Forrest, E. Williamson, J. Buongiorno, Hu Lin-Wen, M. Rubner, R. Cohen // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2010. – Vol. 53, Is. 1–3. – P. 58–67.
11. **Jackson, J. Bryan J.,** Investigation into the Pool Boiling Characteristics of Gold Nanofluids, M. Sc. thesis, University of Missouri, Columbia, Mo., USA, (2007).
12. **Ovcharenko, F.D.** Stability and coagulation of aqueous dispersions of graphite in electrolyte solutions. Report 1. Effect of concentration and charge of counterions on z-potential and stability of graphite dispersions / F.D. Ovcharenko, V.N. Moraru, L.E. Moraru // Colloid Journal. – 1980. – V. 42, № 5. – P. 880–885.
13. **Овчаренко, Ф.Д.** Лиофильность и структурообразование минеральных дисперсий (обзор) / Ф.Д. Овчаренко, В.Н. Морару // Физико-химическая механика и лиофильность дисперсных систем. – К. : Наукова думка, 1984. – Вып. 16. – С. 3–13.
14. **Moraru, V.N.** Influence of Cation Exchange on Electrokinetic and Rheological Properties of the Oxidized Graphite Dispersions / V.N. Moraru // Colloids & Surfaces A: Physicochem. Eng Aspects 2003, 222. – P. 195–206.
15. **Moraru, V.** Structural transitions in aqueous suspensions of natural graphite / V. Moraru, N. Lebovka, D. Chevchenko // Colloids and Surfaces : Physicochemical Eng. Aspects, 242 (2004). – P. 181–187.
16. **Бондаренко, Б.И.** Наножидкости для энергетики: влияние стабилизации на критический тепловой поток при кипении / Б.И. Бондаренко, В.Н. Морару, С.В. Сидоренко, Д.В. Комыш, А.И. Ховавко // Письма в ЖТФ. – 2012. – Т. 38, Вып. 18. – С. 68–78.
17. **Bondarenko, B.I.** SOME PECULIARITIES OF HEAT EXCHANGE AT POOL BOILING OF ALUMINOSILICATES-WATER BASED NANOFLUIDS / B.I. Bondarenko, V.N. Moraru, S.V. Sydorenko, D.V. Komys, A.I. Khovavko, A.V. Snigur // Proceedings of the 8-th International Symposium on Heat Transfer ISHT-8 October 21-24, 2012, Beijing, China. – P. 181–190.
18. **Чернобыльский, И.И.** Исследование механизма теплообмена при кипении жидкостей / И.И. Чернобыльский, М.И. Павлицев, С.В. Сидоренко // Химическое машиностроение : сб. – К. : Техніка, 1973. – № 18.
19. **Павлицев, М.И.** Исследование плотности центров парообразования при кипении воды в неограниченном пространстве / М.И. Павлицев, С.В. Сидоренко, А.Н. Кашурин, В.И. Воевода // Химическое машиностроение : сб. – К. : Техніка, 1974. – № 19.
20. **Пат. №01644u.** Спосіб визначення щільності центрів пароутворення при кипінні рідини на зовнішніх поверхнях нагрівання / Сидоренко С.В., Середюк Н.В. – Опубл. 25.03.2010.

Поступила в редакцію 02.07.2013

Композиційні суміші рідин з невеликими добавками наночастинок отримали назву нанорідин. З 2010 р. в Інституті газу Національної академії наук України проводяться роботи щодо створення стійких нанорідин, придатних для використання в теплотехніці та енергетиці. Були виконані дослідження критичних теплових потоків і коефіцієнтів тепловіддачі при кипінні різних нанорідин на основі водних дисперсій, що містять вуглець і природні алюмосилікати. Отримані результати свідчать про істотне підвищення (у 2–3 рази) критичних теплових потоків при кипінні створених стабілізованих нанодисперсій.

Composite mixture of liquids with small addition of nanoparticles called nanofluids. Since 2010 the specialists of the Institute of Gas of the National Academy of Science of Ukraine have been working on creating sustainable nanofluids useable in heat engineering and energy. It was organized investigation of critical heat flows and heat-transfer coefficients at boiling of various nanofluids based on aqueous dispersions containing carbon and natural aluminum silicates. The obtained results show significant increase (2-3 times) of critical heat flows at boiling the stabilized nanodispersions.