

## КОМІРКИ БЕНАРА

*В статті представлено дослідження процесу виникнення елементарних конвективних комірок у шарі в'язкої нестисливої рідини. Методом розмірних оцінок встановлено теоретично умови виникнення елементарних конвективних комірок в шарі в'язкої нестисливої рідини при її нагріванні знизу, експериментально визначено характерні фізичні параметри комірок Бенара, проведено їх класифікацію, встановлено умови виникнення різних типів комірок, визначено розподіл температур в комірках, досліджено можливість регулювання параметрів комірок. Результати досліджень дозволяють створити технологічні процеси для отримання матеріалів з певною внутрішньою структурою.*

*Ключові слова:* дисипація, нерівноважні системи, теплопровідність, конвекція, комірки Бенара.

Z.YU. OSTROVSKY, M.S. MIL

Khmelnytsky territorial office of Small Academy of Sciences

## BENAR CELLS

*The article describes the research of formation process of convective cells in the stratum of a viscous incompressible liquid. With the help of the method of dimensional ratings there were found the conditions responsible for the formation of convective cells in the stratum of a viscous incompressible liquid heated from below; the characteristic physical parameters of Benar cells were experimentally determined; for the first time there was made the classification of convective cells; there were established the conditions of convective cells formation process and the allocation of temperature zones inside the cell, experimentally explored the possibility of regulating the parameters of convective cells. The results of the research enable to create technological processes to produce material with a specific internal structure.*

*Key words:* dissipation, nonequilibrium systems, thermal conductivity, convection, Benar cells.

## Вступ

Існують складні макроскопічні нерівноважні системи, що містять впорядковані структури, в яких порядок народжується з хаосу: вітри, океанські течії, рух материків, потоки сонячної матерії, лазери, конвективні і гідродинамічні комірки, хімічні реакції з часовою і просторовою періодичністю, живі організми тощо. Через складність відкритих систем у них можливе утворення різного виду структур, ключову роль в яких грає дисипація – процес передавання речовини або енергії всередині системи або між системою та навколишнім середовищем. Для існування в системі впорядкованих структур вона повинна бути відкритою, тобто обмінюватися з навколишнім середовищем енергією й ентропією. При цьому зміна енергії чи ентропії має бути достатньою для того, щоб система перебувала в стані, далекому від термодинамічної рівноваги.

Конвекція – один з тих процесів, у результаті яких системи, спочатку неупорядковані, приходять в упорядкований стан. При нагріванні рідини знизу виникає різниця температур між верхньою і нижньою поверхнями. Для малих різниць температур рідина залишається в спокої і тепло передається тільки шляхом теплопровідності. При різниці температур вищій від критичної режим нерухою теплопровідної рідини стає нестійким, і на зміну йому приходить стійкий режим [5, с.123], який характеризується наявністю конвективних осередків. У центрі кожного осередку рідина рухається вгору, а поблизу країв – вниз [7, с.23]. Система, у якій є потоки енергії або речовини (такі системи називаються нерівноважними), налаштовується таким чином, щоб зробити втрати енергії мінімальними [1, с.336]. Висхідні і низхідні потоки рідини строго упорядковуються, утворюючи досить правильну картину: шар рідини ділиться на призми – комірки Бенара, по гранях яких рідина стікає вниз, а всередині піднімається вгору.

## Експериментальна частина

Методом розмірних оцінок нами встановлено, що існує критична різниця температур  $\Delta T$  (за якої відбувається зрив теплопровідного режиму), яка визначається параметрами рідини – в'язкістю  $\eta$ , температуропровідністю  $\chi$ , густиною  $\rho$ , коефіцієнтом об'ємного розширення  $\beta$ , а також товщиною шару рідини  $L$ , яка визначається співвідношенням

$$\Delta T > \frac{\eta \chi}{\rho_1 \beta g L^3} \quad (1)$$

Що більша товщина шару, то за меншої різниці температур на нижній і верхній його межах теплопровідний режим замінюється на конвективний.

Для дослідження конвективних комірок було проведено серію дослідів. Як нагрівник використовувалася електрична плитка потужністю 300Вт, на яку для рівномірності нагрівання поміщалося сталеві пластина товщиною 5 мм. Досліджувану рідину наливали в каструлю з термостійкого скла з плоским дном квадратної форми зі стороною 7 см та вертикальними стінками. Висоту стовпа рідини вимірювали слюсарною лінійкою з ціною поділки 1 мм. Горизонтальність установки контролювали за допомогою будівельного рівня. Для вимірювання температури використовувалися мультиметри DT9208A. Процеси утворення комірок Бенара записувалися на відео за допомогою камери телефону. Розміри комірок визначалися за допомогою програми Adobe Photoshop.

Досліди проводилися з дистильованою водою і олією з додаванням до них алюмінієвої пудри. Найкраще утворення комірок спостерігалось в олії з домішками пудри, тому подальші дослідження проводилися з цією рідиною.

У процесі нагрівання рідини від температури навколишнього середовища до температури кипіння виникали комірки Бенара, які з часом послідовно змінювали форму: назвемо їх комірки-многокутники, округлі комірки, комірки-шестикутники, напрямлені комірки та напрямлені рухомі комірки. Комірками-многокутниками – комірки у формі неправильних многокутників, кількість кутів яких варіюється від 4 до 7. Округлі комірки набувають форми кругів, а комірки-шестикутники – форми многокутників які мають 6 кутів. У напрямлених комірках ділянка з висхідним потоком рідини сильно зміщена до одного з країв, на відмінну від інших типів комірок, де вона знаходиться практично в самому центрі комірки. До того ж протилежна частина комірки сильно видовжується і розширюється до центра посудини. Направлені комірки мають значно більші розміри, ніж інші типи комірок. Направлені рухомі комірки аналогічні напрямленим, але вони ще й рухаються до центру посудини. У них відсутні гострі кути, всі краї заокруглені. Після того, як напрямлена комірка зрушила з місця, на її місці виникає нова, яка рухається за нею. Під час руху комірки зберігають свою форму і ледь розширюються, наближаючись до центру посудини. Із підвищенням температури швидкість їх руху зростає. Спільним для всіх типів комірок є однаковий принцип циркуляції рідини всередині комірки та розмежування на ділянки різної температури. Відмінними є форма та розміри комірок, температура їх утворення і зникнення, різниця температур у центрі комірки та на межі їх поділу.

На фотографіях (рис. 1) темна ділянка всередині кожної комірки – це частина, по якій нагріта рідина підіймається вгору. Рух рідини в кожній комірці відбувається від центральної частини до країв; досягнувши їх, рідина стікає донизу. До того ж температура в комірці не є однаковою: в частині, де відбувається висхідний рух рідини, вона найбільша, а в місцях низхідного потоку – найнижча. Різниця цих температур  $\Delta t$  змінюється залежно від товщини шару рідини та типу комірки. Від цих факторів також залежать і розміри комірок.

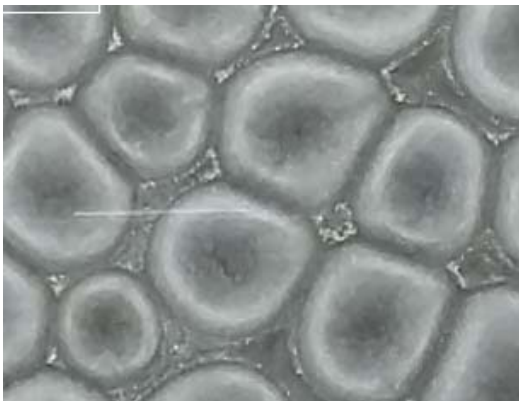


Рис. 1. Комірки Бенара



Рис. 2. Зникнення структури

При товщині шару рідини близько 1 мм комірки не утворюються, оскільки нагрівання всіх шарів відбувається рівномірно. Мінімальною товщиною шару рідини, при якій з'являються чіткі структури, є  $h_0=3$  мм. Крім того, дослідження проводилися для шарів товщиною  $h_1=5,5$  мм,  $h_2=8$  мм,  $h_3=10,5$  мм. При товщині шару рідини  $h_3=10,5$  мм форма комірок змінюється дуже динамічно, зникає їх впорядкованість та чітка форма (рис. 2). Таким чином, товщина шару  $h_2=8$  мм є максимальною товщиною шару рідини в даних умовах досліду, при якій спостерігаються комірки Бенара.

При нагріванні рідини спочатку з'являються комірки-многокутники (рис. 3), які перетворюються на округлі комірки (рис. 4), з яких утворюються комірки-шестикутники (рис. 5), потім – напрямлені комірки (рис. 6), які трансформуються в напрямлені рухомі комірки (рис. 7). Середні значення температур, за яких з'являються та зникають комірки, отримані на основі п'яти дослідів з кожним шаром рідини, наведено в таблиці 1.

Таким чином, форма комірок визначається температурою рідини і товщиною її шару. При товщині шару рідини 8 мм округлі комірки та комірки-шестикутники не утворюються. Направлені рухомі комірки не зникають до початку процесу кипіння рідини. Що більша товщина шару рідини, то при меншій температурі рідини з'являються комірки, що узгоджується з формулою .

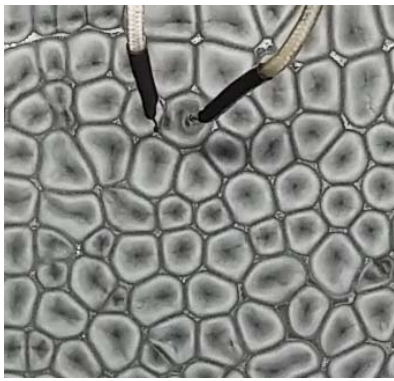


Рис. 3. Колірні-многокутники

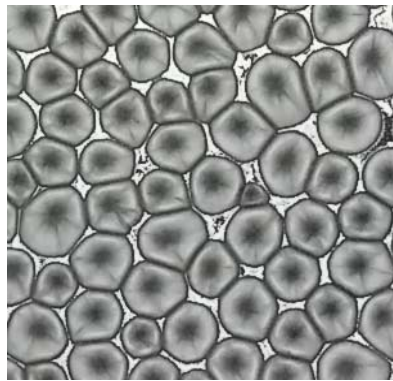


Рис. 4. Округлі комірки

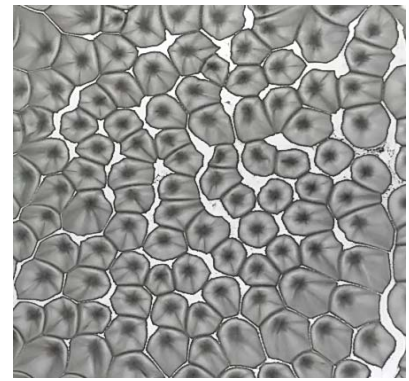


Рис. 5. Колірні-шестикутники

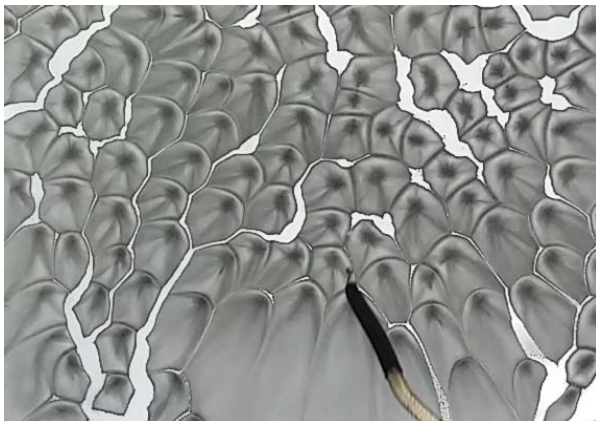


Рис. 6. Напрявлені комірки



Рис. 7. Напрявлені рухомі комірки

Таблиця 1

## Температура появи та зникнення комірок при різній товщині шару рідини

Тип комірки	Висота шару рідини $h$ , мм	Температура, за якої з'являються комірки $t_1$ , °C	Температура, за якої зникають комірки $t_2$ , °C
Колірні-многокутники	3	27,5	47,5
	5,5	26,5	36,5
	8	21	27,5
Округлі комірки	3	36	61
	5,5	31,5	48
	8	-	-
Колірні-шестикутники	3	49,5	92
	5,5	39,5	60,5
	8	-	-
Напрявлені комірки	3	39,5	99
	5,5	33,5	67,5
	8	28	39
Напрявлені рухомі комірки	3	90,5	-
	5,5	55,5	-
	8	32,5	-

Для дослідження розподілу температур у верхньому шарі рідини датчики температури мультиметрів поміщалися в центрі комірки і на межі їх поділу, тобто вимірювалася температура в місцях висхідного і низхідного потоків рідини (рис. 8). Вимірювання проводилися 10–15 разів для кожного випадку. Середні значення різниці цих температур для різних типів комірок і різних висот шарів рідини наводяться в таблиці 2.



Рис. 8. Дослідження розподілу температур у комірці

Таблиця 2

**Різниця температур  $\Delta t$  для різних типів комірок та шарів рідини**

Висота шару рідини $h$ , мм	Форма комірок				
	Комірки-многокутники	Округлі комірки	Комірки-шестикутники	Напрявлені комірки	Напрявлені рухомі комірки
	Різниця температур $\Delta t$ , °C				
3	3,6	4,0	6,6	7,4	9,7
5,5	2,5	3,1	4,3	5,5	7,1
8	1,4	-	-	3,2	4,6

Як видно, різниця між температурою в центрі комірки і на межі поділу комірок різна для різних типів комірок і зростає зі збільшенням температури рідини та зменшується зі збільшенням товщини шару рідини.

Параметром, який характеризує розміри комірок, був обраний периметр комірки, який визначався на основі фотографій за допомогою програми Adobe Photoshop. Результати вимірювань наведені в таблиці 3. Периметр напрямлених рухомих комірок не визначався, оскільки вони постійно змінювали свої розміри.

Таблиця 3

**Периметр комірок при різній товщині шару рідини**

Висота шару рідини $h$ , мм	Форма комірок				
	Комірки-многокутники	Округлі комірки	Комірки-шестикутники	Напрявлені комірки	Напрявлені рухомі комірки
	Периметр комірок				
3	3,1	2,6	3,3	4,2	-
5,5	4,3	4,7	5,5	8,2	-
8	6,2	-	-	8,7	-

Як бачимо, периметр комірок зростає зі збільшенням температури. Збільшення товщини шару рідини приводить до збільшення розмірів комірок і, відповідно, зменшення їх кількості.

Під час різкого охолодження нагрітої рідини (для цього посудину поміщали в холодну воду температурою 18°C) комірки швидко зменшували свої розміри, а їх кількість зростала. Комірки отримували особливий зовнішній вигляд – центральна частина, по якій рідина підіймається вгору, дуже сильно розширювалася і починала займати майже всі розміри комірки (рис. 9, рис. 10). Напрямок циркуляції рідини в комірці зберігався сталим. З охолодженням рідини розміри комірок збільшувалися, їх кількість зменшувалася, вони починали зникати від краю посудини до центру. Що до більшої температури була нагріта рідина, то менших розмірів набували комірки, утворені на початку різкого охолодження.



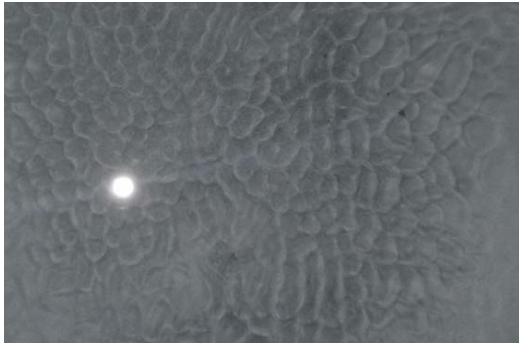


Рис. 9. Швидке зменшення розмірів комірок



Рис. 10. Швидке зменшення розмірів комірок

### Висновки

Таким чином, із ростом температури дна посудини з рідиною кількість циліндричних конвективних осередків мінімального діаметра збільшується від одного-двох аж до заповнення ними всієї поверхні рідини. На наш погляд, явище зародження одного осередку і подальшу появу інших зумовлено тим, що вони переносять більше тепла в одиницю часу між шарами рідини, ніж за простого збільшення діаметра осередку. Оскільки потужність конвективного потоку рідини прямо пропорційна радіусу так, як і периметру осередку, рідина розбивається на гексагональні конвективні комірки меншого діаметру. Формування двох однакових циліндричних осередків з меншим радіусом, енергетично більш вигідне, ніж одного осередку, але більшого радіуса. Виходячи з наведеного вище твердження, можна сформулювати принцип покриття поверхні рідини багатокутними структурами. Оскільки збільшення температури дна посудини приводить до зростання числа елементарних циліндричних осередків, то повинен настати момент, коли вони почнуть стикатися і в результаті щільного скупчення утворювати багатокутники, які вкривають поверхню рідини. При цьому структура багатокутників з мінімальними радіусами конвективних осередків, а отже, великим сумарним периметром осередків забезпечує максимальне перенесення тепла. В ідеальному випадку такими багатокутниками є шестикутники. Подальше збільшення температури дна ємності руйнує встановлений порядок, і шар рідини переходить у стадію хаотичного конвективного руху. Нами встановлено, що комірки змінюють свою форму в процесі нагрівання, що не описано в жодному із опрацьованих джерел, зроблено класифікацію комірок.

Експериментально підтверджена стійкість конвективного процесу та можливість регулювання параметрів комірок нагріванням та охолодженням різної інтенсивності, що дає можливість отримувати матеріали з певною внутрішньою структурою. Такі матеріали можна отримувати з розплавів речовин, створюючи критичну різницю температур на верхній і нижній межі та комбінуючи процеси нагрівання і швидкого охолодження речовини до переходу її у твердий стан зі збереженням утворених структур. На нашу думку, такий метод може використовуватися для створення матеріалів з наперед заданими властивостями.

### Література

1. Біленко І.І. Фізичний словник / І.І. Біленко. – К. : Вища школа. Головне видавництво, 1979. – 336 с.
2. Брук Ю. Метод размерностей помогает решать задачи / Ю. Брук, А. Стасенко // Квант. – 1981. – № 6. – 37 с.
3. Геворкян Р.Г. Курс общей физики : учебное пособие для вузов / Р.Г. Геворкян, В.В. Шепель. – 3-е изд., перераб. – М. : Высшая школа, 1972. – 600 с.
4. Кухлинг Х. Справочник по физике / Х. Кухлинг. – М. : Мир, 1983. – 519 с.
5. Введение в теорию самоорганизации открытых систем / Д.И. Трубецков, Е.С. Мchedalova, Л.В. Красичков. – М. : Физматлит, 2002. – 198 с.
6. Введение в теорию самоорганизации открытых систем [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://sgtnd.narod.ru/papers/tmk.pdf>.
7. Физический энциклопедический словарь. – М. : Советская энциклопедия, 1984. – 944 с.
8. Шефер В. Наблюдение над утренней чашкой кофе / В. Шефер // Квант. – 1977. – № 4. – С. 22–26.

Рецензія/Peer review : 14.3.2017 р.

Надрукована/Printed : 15.4.2017 р.  
Рецензент: д.т.н., проф. Любчик В.Р.