

**Chornij Z.P., Vajdanitch V.I., Pirko I.B., Djachuk N.V., Salapak V.M, Kobrunovitch M.S. Activator Radio Luminescence in BaCl<sub>2</sub>-Pb Crystal in the Temperature Interval 145-300 K**

The mechanism of radio luminescence of BaCl<sub>2</sub>-Pb crystals in the temperature range 145-300 K is studied in the linear model of the crystal. The probability of radioactive and thermal relaxation of electron-hole pairs in the crystal lattice and their dependence on the activator concentration and temperature exposure of the crystal are calculated. The spectrum of radio luminescence of BaCl<sub>2</sub>-Pb<sub>2</sub> crystal is shown to consist of two bands with maxima at λ=550 nm and 320 nm. The energy output of radio luminescence in bands of 550 and 320 nm, and the dependence of the energy output on the content of impurities in the crystal are calculated.

**Key words:** crystals, radiation, radio luminescence, band, colour centers.

УДК 662.61:621

*Проф. Н.М. Фиалко<sup>1</sup>, д-р техн. наук; вед. науч. сотр. Ю.В. Шеренковский<sup>1</sup>, канд. техн. наук; мл. науч. сотр. Н.В. Майсон<sup>1</sup>; вед. науч. сотр. Н.О. Меранова<sup>1</sup>, канд. техн. наук; доц. Л.С. Бутковский<sup>2</sup>, канд. техн. наук; доц. М.З. Абдулин<sup>2</sup>, канд. техн. наук; мл. науч. сотр. Н.П. Полозенко<sup>1</sup>; аспирант А.В. Клиш<sup>1</sup>; мл. науч. сотр. С.Н. Стрижеус<sup>1</sup>; мл. науч. сотр. А.Б. Тимощенко<sup>1</sup>*

**ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕНОСА В ГОРЕЛОЧНОМ УСТРОЙСТВЕ С ЦИЛИНДРИЧЕСКИМ СТАБИЛИЗАТОРОМ ПЛАМЕНИ**

Представлены результаты исследования закономерностей процессов переноса в горелочном устройстве с цилиндрическим стабилизатором пламени при использовании различных способов интенсификации этих процессов. Проанализирована ситуация, отвечающая применению прямоугольной кольцевой ниши на боковой поверхности стабилизатора. Приведены данные исследования, касающиеся возможности интенсификации смесеобразования топлива и окислителя путем варьирования расположения газоподводящих отверстий относительно срывной кромки стабилизатора.

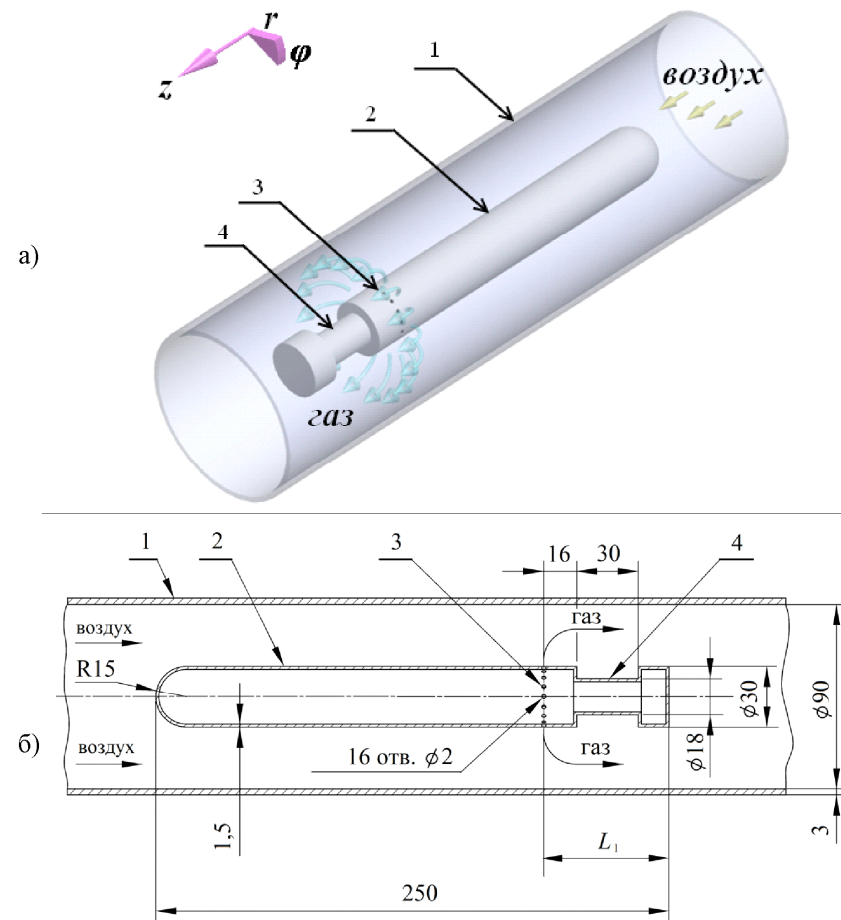
**Ключевые слова:** интенсификация процессов переноса, математическое моделирование, кольцевая ниша, цилиндрический стабилизатор пламени.

**Введение.** Одним из актуальных направлений развития огнетехнического оборудования является повышение эффективности сжигания топлива в соответствующих горелочных устройствах. В последний период широко распространение в энергетической практике находят горелки стабилизаторного типа с внедрением топлива в сносящий поток окислителя с боковых поверхностей стабилизаторов пламени. Различные аспекты рабочих процессов в указанных горелочных устройствах исследованы во многих работах (например [1-3]). Однако, главным образом, рассмотрению подлежали ситуации, отвечающие применению плоских стабилизаторов пламени.

В настоящей работе проведено исследование закономерностей процессов переноса в горелочном устройстве с цилиндрическим стабилизатором пламени при использовании различных способов интенсификации этих процессов. Проанализирована ситуация, отвечающая применению прямоугольной кольцевой ниши на боковой поверхности стабилизатора, а также обсуждены результаты ис-

следования, касающиеся возможности интенсификации смесеобразования топлива и окислителя путем варьирования расположения газоподводящих отверстий относительно срывной кромки стабилизатора.

**Основные результаты исследования.** Схема, продольный разрез и основные геометрические характеристики рассматриваемого горелочного устройства с цилиндрическим стабилизатором пламени приведены на рис. 1.



**Рис. 1. Схема (а) и продольный разрез (б) горелочного устройства с цилиндрическим стабилизатором пламени при наличии кольцевой ниши: 1) цилиндрический канал; 2) цилиндрический стабилизатор пламени; 3) газоподводящие отверстия; 4) кольцевая ниша**

Условия проведения исследования отвечали следующим исходным данным: средняя скорость воздуха во входном сечении горелки  $U_0^a = 10$  м/с; средняя скорость природного газа на выходе из газоподводящих отверстий  $U_0^g = 55,3$  м/с; интенсивность турбулентности на входе в горелочное устройство  $I_0 = 3\%$ ; абсо-

1 Институт технической теплофизики НАН Украины, г. Киев;  
2 Национальный технический университет Украины "КПИ", г. Киев

лютная температура воздуха и газа  $T = 300$  К; расстояние от срывной кромки стабилизатора до газоподводящих отверстий  $L_1 = 0,06$  м. При изучении влияния расстояния  $L_1$  на особенности смесеобразования топлива и окислителя нишевая полость отсутствовала, средняя скорость воздуха на входе в горелочное устройство принималась равной  $4,7$  м/с, а величина  $L_1$  варьировалась в пределах от  $0,015$  м до  $0,14$  м.

В рамках данной работы выполнен комплекс вычислительных экспериментов, базирующихся на использовании RANS подхода к моделированию турбулентных течений. При этом в качестве модели турбулентного переноса применялась  $k-\varepsilon$  модель турбулентности в модификации RNG.

Как свидетельствуют полученные данные, особенности течения топлива и окислителя в горелочном устройстве с цилиндрическим стабилизатором пламени для ситуаций наличия и отсутствия ниши существенно отличаются как в качественном, так и в количественно отношении (рис. 2, 3).

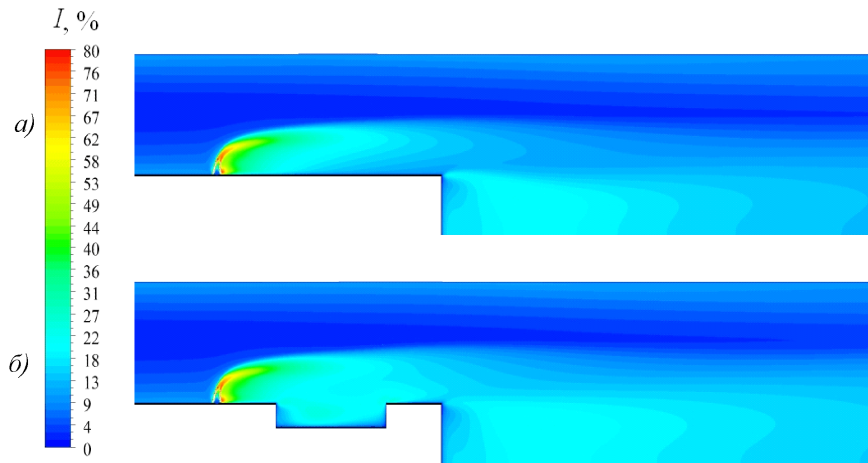


Рис. 2. Поля интенсивности турбулентности в продольном сечении цилиндрического горелочного устройства  $\varphi = 0$ , проходящем через центр газоподводящего отверстия, при отсутствии (а) и наличии (б) нишевой полости

Как видно из рис. 3, при отсутствии нишевой полости радиальные распределения интенсивности турбулентности  $I$  характеризуются наличием двух локальных максимумов. Первый из них имеет место вблизи стенки канала горелки, связанный с пристеночной турбулентностью, второй, более ярко выраженный, соответствует оси газовой струи в сносящем потоке окислителя. При наличии кольцевой ниши к указанным максимумам добавляется еще один, расположенный в собственно нишевой полости и обусловлен наличием так называемого слоя смешения.

В соответствии с результатами расчетов (рис. 3), область наибольшего влияния кольцевой нишевой полости на интенсивность турбулентности потока располагается вблизи внешней поверхности стабилизатора пламени  $r = 0,015$  м. По мере удаления от данной поверхности это влияние уменьшается и на некотором расстоянии от нее уровни  $I$  становятся практически одинаковыми, для

ситуаций наличия и отсутствия нишевой полости. Причем, приближаясь к передней по потоку кромке ниши в фиксированных сечениях  $z = \text{const}$ , выравнивание значений интенсивности турбулентности потока происходит на все меньшем расстоянии  $R$  от наружной поверхности стабилизатора. Так в сечениях, отвечающих задней стенке ниши ( $z = 0,235$  м) и четверти длины ниши от ее передней стенки ( $z = 0,2125$ ), значения  $R$  равны  $0,025$  м и  $0,02$  м соответственно.

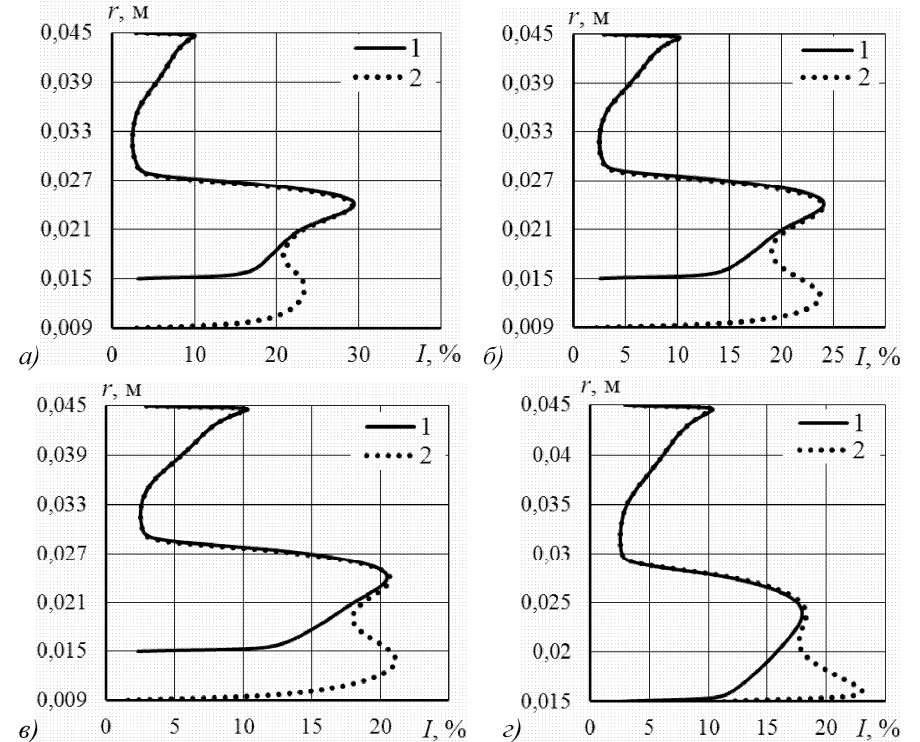


Рис. 3. Распределение интенсивности турбулентности по радиусу горелки при отсутствии (1) и наличии (2) прямоугольной кольцевой ниши в продольном сечении горелочного устройства, проходящем через центр газоподводящего отверстия, при различных значениях осевой координаты  $z$ : а)  $z = 0,2125$  м (четверть длины ниши); б)  $z = 0,22$  м (середина ниши); в)  $z = 0,2275$  м (три четверти длины ниши); г)  $z = 0,235$  м (задняя стенка ниши)

Таким образом, наблюдается локализация влияния кольцевой ниши на интенсивность турбулентности потока вблизи зоны ее расположения на расстоянии  $5-10$  мм от внешней поверхности стабилизатора пламени, что является важным для воспламенения топлива и стабилизации пламени.

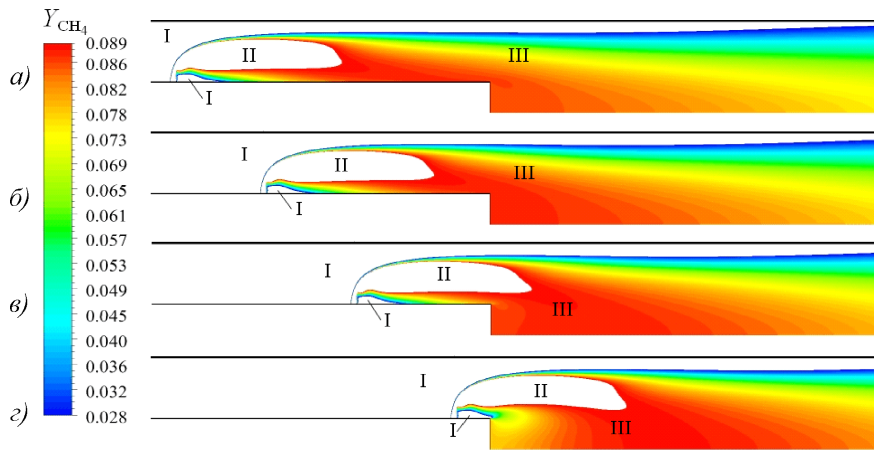
Как показали выполненные исследования, в условиях применения нишевой полости повышение уровня интенсивности турбулентности может быть значительным, по отношению к ситуации ее отсутствия. Так, в сечении проходящем через заднюю стенку ниши ( $z = 0,235$  м) вблизи внешней поверхности стабилизатора ( $r = 0,016$  м) значения  $I$  для сопоставляемых ситуаций равны примерно  $12\%$

и 23 %, т. е. наличие ниши обуславливает повышение интенсивности турбулентности почти в два раза.

Необходимо также отметить, что по результатам выполненных исследований потери давления, связанные с наличием кольцевой прямоугольной ниши, незначительны. А именно, для рассматриваемых условий, в случае отсутствия нишевой полости потери давления  $\Delta P$  в горелке равны 33,2 Па, а при наличии ниши – 35,2 Па. То есть, указанные потери увеличиваются лишь на 2,0 Па.

Перейдем к рассмотрению результатов математического моделирования, иллюстрирующих особенности протекания процессов смесеобразования топлива и окислителя в горелочных устройствах с цилиндрическим стабилизатором пламени при варьировании в широких пределах расстояния  $L_1$  между срывной кромкой стабилизатора и газоподающими отверстиями.

На рис. 4 приведены типичные поля массовой концентрации метана в горелочном устройстве для  $L_1 = 0,14$  м; 0,1 м; 0,06 м и 0,015 м. Зоны отмеченные на рис. 4 отвечают составу смеси с различным содержанием метана: в зоне I массовая доля метана  $Y_{CH_4}$  ниже нижнего концентрационного предела воспламенения ( $Y_{CH_4} < 0,028$ ); зона II отвечает значениям  $Y_{CH_4}$  превышающим верхний концентрационный предел ( $Y_{CH_4} > 0,089$ ); зона III характеризуется содержанием топлива в концентрационных пределах воспламенения ( $0,028 < Y_{CH_4} < 0,089$ ).



**Рис. 4.** Поля массовой концентрации метана в продольном сечении горелки с цилиндрическим стабилизатором, проходящем через центр газоподающего отверстия, при различных значениях расстояния от срывной кромки до газоподающих отверстий  $L_1$ : а)  $L_1 = 0,14$  м; б)  $L_1 = 0,1$  м; в)  $L_1 = 0,06$  м; з)  $L_1 = 0,015$  м

Согласно полученным данным при относительно больших величинах  $L_1$  ( $L_1 > 0,1$  м) в поперечном сечении горелки, проходящем через срывную кромку стабилизатора, большая часть смеси топлива и окислителя находится в концентрационных пределах воспламенения, что соответствует условиям реализации механизма сжигания топлива близкого к кинетическому, т.е. высокоинтенсивному процессу горения.

При сравнительно небольших  $L_1$  ( $L_1 < 0,06$  м) значительную часть сечения горелочного устройства, проходящего через срывную кромку стабилизатора, занимает смесь с повышенным содержанием газа или окислителя, и механизм сжигания топлива приобретает характеристики менее интенсивного диффузионного горения.

**Выводы:**

1. Проведен комплекс математического моделирования по определению закономерностей влияния на характеристики процессов переноса различных способов их интенсификации в горелочных устройствах с цилиндрическим стабилизатором пламени при подаче топлива внедрением в сносящий поток окислителя.
2. Выполнены исследования влияния прямоугольной кольцевой ниши на параметры течения в цилиндрическом горелочном устройстве. В частности установлено, что:
  - при наличии ниши интенсивность турбулентности потока I увеличивается, причем в местах ее максимальных значений может превышать соответствующие величины в случае отсутствия ниши почти в два раза;
  - зона наибольшего влияния ниши на турбулилизацию потока локализуется вблизи места ее расположения, что является важным для воспламенения топлива и стабилизации пламени;
3. Получены данные исследования закономерностей смесеобразования топлива и окислителя в цилиндрических горелках при варьировании в широких пределах расстояния  $L_1$  между срывной кромкой стабилизатора и газоподающими отверстиями. Показано что:
  - при относительно больших величинах  $L_1$  ( $L_1 > 0,1$  м) смешение топлива и окислителя отвечает условиям реализации механизма сжигания топлива близкого к кинетическому, т.е. высокоинтенсивному процессу горения;
  - при сравнительно небольших  $L_1$  ( $L_1 < 0,06$  м) механизм сжигания топлива будет приобретать характеристики менее интенсивного диффузионного горения.

**Литература**

1. Фялко Н.М. Компьютерное моделирование процесса смесеобразования в горелочных устройствах стабилизаторного типа с подачей газа внедрением в сносящий поток воздуха / Н.М. Фялко, Л.С. Бутовский, В.Г. Прокопов и др. // Промышленная теплотехника. – 2011. – № 1. – С. 51-56.
2. Фялко Н.М. Устойчивость факела за плоским стабилизатором при подаче газа внедрением в воздушный поток / Н.М. Фялко, Л.С. Бутовский, Е.А. Грановская // Технологические системы. – 2010. – Т. 52, № 3. – С. 72-76.
3. Фялко Н.М. Моделирование структуры течения изотермического потока в эшелонированной решетке плоских стабилизаторов пламени / Н.М. Фялко, Л.С. Бутовский, В.Г. Прокопов и др. // Промышленная теплотехника. – 2010. – № 6. – С. 28-36.

**Фялко Н.М., Шеренковський Ю.В., Майсон М.В., Меранова Н.О., Бутовський Л.С., Абдулін М.З., Полозенко Н.П., Кліщ А.В., Стрижеус С.М., Тищенко О.Б. Інтенсифікація процесів переносу в пальниковому пристрої з циліндричним стабілізатором полум'я**

Представлено результати дослідження закономірностей процесів переносу в пальниковому пристрої з циліндричним стабілізатором полум'я у разі застосування різних способів інтенсифікації цих процесів. Проаналізовано ситуацію, що відповідає використанню прямокутної кільцевої ніші на бічній поверхні стабілізатора. Наведено дані досліджень щодо можливості інтенсифікації сумішоутворення палива та окисника шляхом ва-

рівняння місця розташування газоподавальних отворів відносно зривної кромки стабілізатора.

**Ключові слова:** інтенсифікація процесів переносу, математичне моделювання, кільцева ніша, циліндричний стабілізатор полум'я.

**Fialko N.M., Sherenkovsky Y.V., Maison M.V., Meranova N.O., Butovsky L.S., Abdulin M.Z., Polozeko N.P., Klishch A.V., Stryzheus S.M., Timoshchenko O.B. The Intensification of Transfer Processes within a Burner with a Cylindrical Flame Holder**

The patterns of relationship investigation results of transfer processes within a burner with a cylindrical flame holder, using different intensification methods of the processes are presented. The case of application a rectangular circular cavity on a lateral face of the flame holder is analyzed. The data of the research concerning potentiality of fuel and oxidizer mixing intensification in way of variation gas supply holes locations relatively the flame holder stalling edge is discussed.

**Key words:** transfer processes intensification, mathematical simulation, circular cavity, cylindrical flame holder.

УДК 674.047

Проф. П.В. Білей, д-р техн. наук;

доц. І.А. Соколовський, канд. техн. наук – НЛТУ України, м. Львів

**ОСНОВИ КІНЕТИКИ ПРОЦЕСУ СУШІННЯ**

Розглянуто фізичні явища, що описують кінетику процесу сушіння, яка характеризується зміною вологості (вологомісту) матеріалу за певний проміжок часу. Процес сушіння поділено на два періоди: сталої та сповільненої швидкостей сушіння. Виведено залежності між інтенсивністю теплообміну і швидкістю сушіння для обох періодів з використанням закону збереження енергії і маси речовини. У цих рівняннях використано теплообмінний і масообмінний критерії Нуссельта і Ребіндера. Наведена методика дає достатньо точні для практичного використання результати з визначення кінетики процесу будь-якого способу сушіння.

**Ключові слова:** теплообмін, масообмін, вологість, вологовміст, температура, теплопровідність, конвекція, сушіння, кінетика, критерії, швидкість сушіння, інтенсивність.

**Вступ.** Кінетика процесу сушіння характеризується зміною середнього вологовмісту –  $\bar{U}_{(\tau)}$  (або середньою за об'ємом вологістю –  $\bar{W}_{(\tau)}$ , %, де  $U_{(\tau)} = 0,01 \cdot W_{(\tau)}$ ) і середньої температури матеріалу –  $\bar{t}_{(\tau)}$  за певний проміжок часу –  $\tau$ . Зміна локального вологовмісту і локальної температури залежить від взаємопов'язаного механізму перенесення тепла і вологи в середині матеріалу та теплообміну і масообміну матеріалу з оточуючим його середовищем. Внутрішній тепломасообмін залежить від будови матеріалу і характеру зв'язку вологи в ньому. Зовнішній тепломасообмін визначається закономірностями взаємодії матеріалу з середовищем. Знаходження полів вологовмісту  $U_{(x,y,z,\tau)}$  і температури можливе розв'язком системи диференціальних рівнянь тепло- і вологоперенесення за відповідних початкових і граничних умов залежно від способу і режиму сушіння [1-4].

**Основна частина.** Розглядаючи найбільш простий випадок сушіння дуже тонкого вологого матеріалу м'якими режимами з постійними параметрами середовища ( $t_c = \text{const}$ ,  $\varphi = \text{const}$ ,  $\omega = \text{const}$ ), то процес сушіння відбувається таким чином. У початковий період зменшення вологості матеріалу є незначним, а температура поверхневих і внутрішніх шарів зростає до температури змоченого термо-

метра –  $t_m$ . У технології сушіння деревини цей період називають початковою тепловологообробкою матеріалу перед сушінням. Після початкового періоду вологість матеріалу зменшується протягом деякого часу за лінійним законом, тобто зменшення вологості за одиницю часу (швидкість сушіння) буде величиною постійною ( $dW/d\tau = \text{const}$ ), а температура поверхні матеріалу також залишиться постійною (тому  $dt/d\tau = 0$ ) і психрометрична різниця ( $\Delta t = t_c - t_m = \text{const}$ ) також є постійною. Цей період продовжується до досягнення матеріалом критичної вологості –  $W_{кр}$ , після чого температура поверхні матеріалу ( $t_{нов}$ ), а за нею і температура центральних шарів ( $t_u$ ), починає зростати.

Поділ процесу сушіння на два періоди сталої та сповільненої швидкості сушіння спостерігається для всіх вологих матеріалів м'якими режимами за умови, що початкова вологість ( $W_0$ , %) є вищою за критичну ( $W_{кр}$ ). Інтенсивність випаровування вологи з поверхні матеріалу ( $i_c$ ) може бути тотожною з інтенсивністю випаровування з поверхні води ( $i_b$ ) за умови, коли  $t_{нов} = t_m$ , а на практиці  $i_c = (1,03 \dots 1,2) \cdot i_b$  за рахунок впливу теплового випромінювання поверхні матеріалу [1, 2].

У процесі конвективного сушіння інтенсивність теплообміну ( $q_n$ , Вт/м<sup>2</sup>) із заданим температурним градієнтом  $\Delta t = (t_c - t_{нов})$  визначаються співвідношенням

$$q_n = \alpha \cdot (t_c - t_{нов}) = Nu_q \cdot \frac{\lambda}{L} \cdot (t_c - t_{нов}), \quad (1)$$

де:  $\alpha$  – коефіцієнт теплообміну, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності вологого повітря, м;  $L$  – довжина поверхні матеріалу вздовж потоку повітря, м;  $Nu_q$  – теплообмінний критерій Нуссельта. Потік вологи під час конвективного сушіння визначається співвідношенням

$$j_n = Nu_m \cdot \frac{D_n}{L} \cdot (P_n - P_c), \frac{\kappa z}{m^2 \cdot c}, \quad (2)$$

де:  $Nu_m$  – масообмінний критерій Нуссельта;  $D_n$  – коефіцієнт дифузії пари в повітря віднесений до різниці тисків, м<sup>2</sup>/с;  $P_n$  – тиск пари на поверхні матеріалу, який дорівнює тиску насичення із температурою поверхні матеріалу –  $t_{нов}$ , Н/м<sup>2</sup>;  $P_c$  – тиск повітря, Н/м<sup>2</sup>.

Оскільки в періоді сталої швидкості сушіння температура матеріалу не змінюється ( $dt/d\tau = 0$ ), то все тепло, яке передається матеріалу, йде на випаровування вологи. Тому, на основі закону збереження енергії можна записати таке рівняння балансу тепла

$$q_n = j_n \cdot r_0, \text{ Bm} / m^2, \quad (3)$$

де  $r_0$  – питома теплота пароутворення, Дж/кг.

Якщо позначити швидкість сушіння в період сталою значення через  $N$ , де  $N = dW/d\tau$ , відношення об'єму до поверхні матеріалу через  $R_v$ , а густину матеріалу в абсолютно сухому стані через  $\rho_0$ , то можна записати

$$q_n = 0,01 \cdot r_0 \cdot \rho_0 \cdot R_v \cdot N, \text{ Bm} / m^2. \quad (4)$$

Таким чином, за величиною швидкості сушіння –  $N$  можна знайти інтенсивність теплообміну  $i$ , навпаки, знаючи інтенсивність теплообміну знайти