

RESEARCH OF HYDRODYNAMICS AND HEAT EXCHANGE MOTION IN THE PIPES OF EVAPORATORS WITH NATURAL CIRCULATION

Y. Porzhezinsky

National University of Food Technologies

Key words:

Evaporator

Knocking over of circulation

Mode

The semi tipped motion over

Heat exchange

Article history:

Received 05.08.2020

Received in revised form 19.08.2020

Accepted 28.08.2020

Corresponding author:

Y. Porzhezinsky

E-mail:

npnuht@ukr.net

ABSTRACT

In the article questions about heat exchange and hydrodynamics in the pipes of modern evaporators during knocking over of circulation were considered.

Knocking over of circulation might be at a significant thermal and hydrodynamic unevenness in a device, in the least heated pipes, in the presence of liquid layer above the upper pipe grate.

During knocking over of circulation in the pipes the next modes of uncast motion of liquid appear: pulsation motion, the semi tipped motion over, when through pipe's walls tape of liquid moves down against flow with steam and uncast motion in the absence of boiling liquid in pipes. The semi tipped motion over exists in the narrow interval of thermal streams and does not depend on the height of swelling. A higher edge is determined by the inversion of stream, when uncast motion is impossible, and lower is determined by a bulk density of irrigation $\Gamma_v \geq 0,0027\sqrt{gd^3}$ when speed of liquid becomes equal to speed of steam bubble demolition. Passing of pipe to uncast motion without boiling is possible only through the semi tipped motion over. Liquid begins to move downward a full pipe, feeds nearby pipes and overheats.

During knocking over of circulation abruptly changes the temperature distribution, average intensity of heat exchange, hydrodynamic terms and structure of stream along length of pipe, that influences on quality of heat-sensitive sugar juices. Therefore knocking over of circulation phenomenon is undesirable.

Experiments showed that in the first and second corps of the evaporators knocking over of circulation was absent. It is preferable to use film device with falling film at flowing with steam on the last corps of the evaporated station.

ДОСЛІДЖЕННЯ ГІДРОДИНАМІКИ І ТЕПЛООБМІНУ В ТРУБАХ ВИПАРНИХ АПАРАТІВ З НАТУРАЛЬНОЮ ЦИРКУЛЯЦІЄЮ

Ю. Г. Поржезінський

Національний університет харчових технологій

У статті розглянуто питання теплообміну і гідродинаміки в трубах сучасних циркуляційних випарних апаратах при перекиданні циркуляції. Перекидання циркуляції можливе при значній тепловій і гідродинамічній нерівномірності в апараті при наявності шару рідини над верхньою трубною решіткою. При перекиданні циркуляції в трубі утворюються такі режими несхідного руху рідини: нестійкий пульсаційний рух, напівперекинутий рух, коли по стінках труби вниз рухається плівка рідини в протитоці з паром, і несхідний рух при відсутності кипіння рідини в трубах. Напівперекинутий рух існує у вузькому інтервалі теплових потоків і не залежить від висоти набухання. Верхня межа визначається інверсією потоку, коли неможливий несхідний рух, а нижня — об'ємною густиною зрошування $\Gamma_v \geq 0,0027\sqrt{g d^3}$, коли швидкість рідини дорівнює швидкості зносу парової бульбашки. Перехід труби на несхідний рух без кипіння можливий тільки через напівперекинутий рух. Рідина починає рухатись вниз повною трубою, живить сусідні труби і перегрівається.

При перекиданні циркуляції різко змінюється розподіл температур, середня інтенсивність теплообміну, гідродинамічні умови і структура потоку по довжині труби, що впливає на якість термочутливих цукрових соків, тому перекидання циркуляції небажане явище.

Досліди показали, що на першому і другому корпусах випарних апаратів перекидання циркуляції відсутнє. Бажано на останніх корпусах випарної станції використовувати плівкові апарати з падаючою плівкою при прямотоці з паром.

Ключові слова: випарний апарат, перекидання циркуляції, напівперекинутий рух, теплообмін.

Постановка проблеми. В цукровій промисловості широке розповсюдження отримали циркуляційні випарні апарати. Ці апарати мають ряд переваг: легкість регулювання режиму випаровування, менша чутливість до коливань подачі соку, нескладна конструкція тощо. Основний недолік апаратів — відносно великий час перебування розчину в апараті, що приводить до втрат цукру і зростання кольоровості соку, низька інтенсивність тепловіддачі α_2 на останніх корпусах випарної станції, що працюють на низьких теплових потоках.

На випарних апаратах з натуральною циркуляцією кип'ятильна труба працює тільки з максимального продуктивністю на оптимальному п'єзометричному рівні h_K (опт.), який визначається мінімальною швидкістю циркуляції, достатньої для зрошування всієї поверхні нагріву труби. Робота апарата при $h_K > h_{K \text{ опт}}$ приводить до зниження α_2 за рахунок збільшення економайзерної ділянки, а при роботі $h_K < h_{K \text{ опт}}$ знижується α_2 за рахунок оголення верхніх ділянок труби, одночасно

збільшується кольоровість соку. Останнє приводить до того, що випарні апарати цукрової промисловості працюють при $h_k > h_{k \text{ опт.}}$

У наш час продуктивність цукрових заводів зростає до 6—10 тис. тонн буряка на добу, одночасно збільшується поверхня нагріву випарних апаратів до 2120, 2360, 3000 м² та їхня теплова і гідравлічна нерівномірність в обігріві труб, що приводить до порушення циркуляції в трубах, які нагріваються найменше. Зростання кольоровості заводських соків багато залежить від теплових і гідродинамічних режимів у трубах випарних апаратів.

Гідродинаміка і теплообмін при порушенні циркуляції в трубах випарних апаратів з натуральною циркуляцією досліджені недостатньо, переважно мають протилежне тлумачення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Як показали останні дослідження [2], при значній тепловій нерівномірності в обігріві труб на низьких теплових потоках, на яких працюють останні корпуси випарної станції [1], в окремих трубах, що нагріваються найменше, можливе утворення несхідного руху рідини, перекидання циркуляції.

Ю. Л. Сорокін, обробляючи дослідні дані [3], довів, що при значенні критерію стійкості двофазного потоку $K \approx 3,2$ двофазний потік у кип'ятильній трубі рухається тільки вгору, для протитечійного режиму настає інверсія потоку і несхідний рух неможливий:

$$K = \frac{w'' \sqrt{\rho'' g}}{\sqrt[4]{g^3 \sigma (\rho' - \rho'')}} \quad (1)$$

де w'' — швидкість пари, м/с; ρ' , ρ'' — густини рідини та пари, кг/м³; σ — поверхневий натяг рідини, н/м; g — прискорення земного тяжіння, м/с².

Теплообмін при несхідних плівкових течіях цукрових розчинів у кип'ятильній трубі детально досліджений у [5].

У циркуляційному контурі парогенератора з натуральною циркуляцією при наявності значної теплової і гідродинамічної нерівномірності можливо перекидання циркуляції в екранній трубі, яка виходить під рівень води в барабані і має найменшу інтенсивність обігріву. Ці питання детально відпрацьовані, також розроблена методика розрахунку порушення циркуляції в парогенераторах [4], але конструктивно і за умовами роботи котел значно відрізняється від випарного апарата.

Мета статті: дослідити теплообмін і гідродинаміку процесів при порушенні циркуляції й утворенні несхідного руху рідини в кип'ятильних трубах задля зменшення кольоровості бурякових соків і підвищення інтенсивності теплообміну у випарних апаратах з натуральною циркуляцією.

Викладення основних результатів дослідження. У циркуляційних випарних апаратах з великою поверхнею нагріву існує теплова й гідродинамічна нерівномірність, однак усі кип'ятильні труби працюють при однаковому п'єзометричному рівні h_k . Для кожної кип'ятильної труби справедливе рівняння:

$$\rho' g (h_n + L_{\text{ек}}) + (L_{\text{тр}} - L_{\text{ек}}) \rho_{\text{см}} g + \Delta P_{\text{оп}} = h_k \rho' g, \quad (2)$$

де h_n — ваговий рівень набухання над верхньою трубною решіткою, м; ρ' , $\rho_{\text{сум}}$ — густина рідини і парорідинної суміші, кг/м³.

При зменшенні теплового навантаження в трубі зменшується економайзерна ділянка $L_{ек}$, падає швидкість циркуляції і швидкість пари w'' . Опір $\Delta P_{оп}$ в трубі також зменшується. В окремих трубах апарата, що майже не нагріваються, економайзерна ділянка може досягнути такої величини, що циркуляція в трубі зупиняється. При наявності над кип'ятильною трубою шару рідини h_n і при швидкості пари на виході менше за $w''_{кр}$, отриманої із рівняння (1) при $K < 3,2$, труба починає працювати в напівперекинутому режимі. Труба живиться рідиною, що над трубою решіткою, по стінках труби рухається плівка рідини вниз, а по центру відбувається підкидання рідини парою, що рухається вгору. Труба живить рідиною із сусідньої труби і працює з високим значенням α_2 по всій довжині в області стійкого напівперекинутого руху при загальному п'єзометричному рівні $h_{к(опт)}$.

Процес у трубі при напівперекинутому русі визначається швидкістю пари на виході із труби, тобто співвідношенням гравітаційних сил і дотичних сил тертя на границі розділу фаз $\tau_{дот}$ і не залежить від величини h_n . Дотичні сили визначаються за формулою:

$$\tau_{дот} = \xi_{тр} \frac{w''_{від}{}^2 \rho''}{8}, \quad (3)$$

де $\xi_{тр}$ — коефіцієнт опору тертя; $w''_{від} = w'' + U$ — відносна швидкість пари, м/с; w'' — швидкість пари, м/с; U — швидкість плівки на границі розділу фаз м/с.

Із формули видно що зі зменшенням тиску вторинної пари (ρ'' зменшується), збільшенням діаметру труби, (зменшення $w''_{від}$) область існування напівперекинутого руху збільшується.

З падінням теплового потоку швидкість пари зменшується, товщина плівки рідини і її швидкість руху зростає і при умові, що об'ємна густина зрошування $\Gamma_v \geq 0,0027\sqrt{gd^3}$, м/с, утворюється несхідний рух рідини без кипіння. При цьому кольоровість стоку збільшується за рахунок його перегріву в опускних кип'ятильних трубах, тому випарні апарати повинні працювати в умовах, що усувають несхідний рух рідини без кипіння. Кип'ятильна труба у випарному апараті при несхідному русі рідини без кипіння стійко працює тільки при відсутності закипання в ній рідини. З початком пароутворення корисний напір труби різко збільшується, швидкість циркуляції зменшується і труба переходить на підйомний рух. Утворення в трубі несхідного руху рідини без кипіння можливо тільки через напівперекинутий рух, як і в парогенераторах [4].

Збільшення корисної різниці температур між температурою кипіння рідини і вторинною парою, довжини труби і вагового навантаження апарата усуває можливість перекидання циркуляції. Напівперекинутий рух рідини існує у вузькому інтервалі теплових потоків, верхня межа визначається інверсією потоку, коли неможливий несхідний плівковий рух $K \geq 3,2$ [3], а нижній густиною зрошування, коли швидкість рідини дорівнює швидкості зносу парової бульбашки в трубі.

Інтенсивність теплообміну при напівперекинутому русі може бути нижчою, вищою і дорівнювати інтенсивності теплообміну підйомного руху на оптимальному рівні. При пульсаційному режимі, коли тільки починається напівперекинутий рух, рідини, що надходить у трубу недостатньо для повного зрошення всієї поверхні нагріву, тому коефіцієнт тепловіддачі (α_2) буде нижчим за $\alpha_{2опт}$. Наявність рідини внизу труби сприяє зрошенню нижніх ділянок труби і підвищує α_2 .

Із зниженням теплового потоку G_v збільшується, умови зрошування труби поліпшуються. При низьких теплових потоках $q < 2 \cdot 10^3$ Вт/м² величина α_2 визначається теплообміном при плівковому русі рідини, інтенсивність теплообміну порівняно з кипінням в підйомних трубах на $h_{K \text{ опт}}$ збільшується [5]. При несхідному русі рідини повною трубою без кипіння інтенсивність теплообміну падає і визначається за формулами теплообміну при русі рідини без кипіння.

Для випарних апаратів з натуральною циркуляцією, що працюють на теплових потоках ($q > 10500$ Вт/м²), на оптимальному рівні рекомендується тримати шар рідини $h_n = 100$ мм над верхньою трубою решіткою за рахунок подовження опускних труб чи утворення переливу в ці труби. Завдяки цьому апарат стійко працює з $h_K \leq h_{K \text{ опт}}$ без оголення верхніх ділянок труби за рахунок затікання рідини із h_n з високим α_2 по всій довжині труби.

Досліди показали, що на першому і другому корпусах випарних апаратів перекидання циркуляції відсутнє.

Висновки

1. При значній тепловій і гідродинамічній нерівномірності та наявності шару рідини над вертикальною трубою решіткою у випарному апараті в трубах, що нагріваються найменше, може утворитись напівперекинутий рух, який при об'ємній густині зрошування $G_v \geq 0,0027\sqrt{g d^3}$ переходить у несхідний рух рідини без кипіння, що погіршує якість соку.

2. Для запобігання оголення верхніх ділянок кип'ятильної труби при коливаннях подачі соку на апарат необхідно підтримувати ваговий рівень набухання $h_n = 100$ мм над верхньою трубою решіткою.

3. При реконструкції випарної станції бажано залишати на першому і другому корпусі циркуляційні апарати, а інші корпуси, де можливе перекидання циркуляції і низький α_2 , замінити на плівкові апарати з незхідною плівкою в прямотоці з паром.

Література

1. Тобілевич Н. Ю., Матвієнко Б. А. Теплова і гідравлічна нерівномірність у трубних пучках випарних апаратів і вирпарників. *Харчова промисловість*. 1966. № 3. С. 18—20.
2. Поржезінський Ю. Г. Порушення циркуляції у випарних апаратах з природною циркуляцією цукрового заводу. *Цукор України*. 2014. № 2(98). С. 29—30.
3. Сорокін Ю. Л. Кудряшен А. Г., Покусаєв Б. Г. Исследование устойчивости пленочного режима течения жидкости в вертикальных трубах при восходящем движении газа. *Химическое и нефтяное машиностроение*. 1965. № 5. С. 16—18.
4. Локшин В. А. Гидравлический расчет котельных агрегатов. Нормативный метод. Москва: Энергия, 1978. С. 225—255.
5. Петренко В. П. Рябчук О. М., Мірошник М. М. Теплообмін в процесах кипіння та випаровування з вільної поверхні плівок цукрових розчинів в низхідних кільцевих потоках. *Харчова промисловість*. 2015. № 18. С. 124—126.