**Аналіз літератури по кипінню і кризи кипіння, отриманих на різних стендах при різних умовах**

**Analysis of the literature on boiling and boiling crises obtained on different stands under different conditions**

Науковий керівник: Д.т.н., проф. кафедри атомних електричних станцій

Корольов О.В., магістр Щедрова Н.. О.

Scientific adviser: Doctor of Technical Sciences, Prof. Department of Nuclear Power Plants

Korolyov O.V., Master Shchedrova N.

**Анотація:** У даній роботі наведено ретроспективний аналіз літератури з кризи кипіння, встановлено, що спостерігається різний тепловий потік при різних методах дослідження кризи кипіння в великому обсязі. Встановлено, що першим звуком є поява бульбашки.

**Ключові слова:** аналіз, АЗ5, криза кипіння, ретроспективний аналіз, метод, розрахунок.

**Annotation**: This paper presents a retrospective analysis of the literature on crisis boiling water. It is established that different heat flow is observed at different ways of heating the stand. At the experimental setup, studies of crisis boiling water are tested to a greater extent. It is established that the first sound is the filling of the bubble.

**Keywords**: boiling crisis, analysis, AZ5, retrospective analysis, method, calculation.

Ретроспективний аналіз літератури з кризи кипіння показав суттєві відмінності, як в кількісних, так і якісних показниках процесу кипіння.

Питання є важливим, тому що дозволяє уточнити вплив на теплоомасообмін малих коливань поверхні нагрівання, турбулізуючими пристінний шар рідини.

У Розеновим В. розглянуто вплив ступеня недогріву рідини на характер кривої кипіння у великому обсязі. Результати експериментальних досліджень кипіння на нержавіючої трубці  1,6 мм і на плоскому горизонтальному нагрівачі з ніхрому розміром 106 х 104 мм 2 і товщиною 4,1 мм показали протилежні результати. Так, для пластини, криві кипіння зміщувалися вліво з ростом недогріву, тоді як для трубки - вправо. Різниця між цими результатами автор пояснював різними умовами утворення зародків пара на теплопередаючій поверхні.

Тут же аналізується впливу діаметра дроту і змочуваність поверхні на процес кипіння. Відзначено, що «вплив розміру або орієнтації нагрітої дроту на залежність q(Т) в області бульбашкового кипіння дуже мало, однак цей вплив проявляється в області природної конвекції - коли кипіння немає. При плівковому кипінні криві для дротів меншого діаметру лежать лівіше. Якщо рідина не змочує поверхню нагріву, то утворюються дуже великі бульбашки, що покривають великі площі поверхні нагрівання. В результаті критичний тепловий потік падає в 10 ... 20 разів ».

У своєму огляді, що стосується досліджень критичного теплового потоку при вимушеному русі, Дж. Хьюітт також зазначає важко поясненні з точки теплофізики приклади аномального поведінки процесів теплообміну.

Так, дослідження Смоліна та Полякова на стрижневих збірках з електрообігрівом показали, що істотний вплив на критичну щільність теплового потоку надає відстань між дистанціонуючими гратами. Зокрема, при зменшенні кроку з 0,7 м до 0,35 м і потім до 0,175 м, критична щільність теплового потоку зростала з кожним кроком приблизно на 0,2 МВт / м2 Аналогічні дослідження, проведені Каціонісом і ін., Показали, що криза завжди виникає у верхній частині решітки. Ці спостереження можуть бути пояснені з позицій електродинамічних сил в такий спосіб - зміна кроку між дистанціонуючими гратами веде до зміни амплітуди і частоти вібрацій трубки, а мінімальна амплітуда цих коливань завжди буде поблизу місця її кріплення, тобто у вузлах кріплення трубки, в т. ч. і за допомогою дистанціонуючої решітки. Цей факт підтверджений в наших дослідах по дослідженню кризи теплообміну на ніхромовому дроті 0,2 мм, де перепал дроту практично в 100% випадків спостерігався в точках кріплення дроту.

У дослідженнях критичної щільності теплового потоку, також відзначено, що "причиною найбільш істотних розбіжностей досвідчених даних по qкр служить порушення геометрії проточної частини кільцевих і стрижневих збірок, тобто неконтрольований ексентриситет, що з'являється в процесі їх виготовлення і монтажу ... "

До інших тяжкопояснювальних результатів привело експериментальне дослідження Макбета, якому вдалося зняти в збірці з 30 стрижнів велику на 50% теплову потужність, ніж в збірці з 36 стрижнів. Макбет пояснює це розбіжність виникненням «поперечних пульсацій» між сусідніми осередками в збірці з 36 стрижнів (парне число зовнішніх осередків) на відміну від збірки з 30 стрижнів (непарне число осередків). При цьому Хьюітт помітив, що було б бажано підтвердити виявлені Макбет результати і провести дослідження механізму виникнення цих пульсацій.

З позицій електродинамічних сил ця розбіжність може бути пояснена таким чином: при перебігу струму по паралельних стержнів між ними виникають періодичні сили тяжіння, які змушують трубки вібрувати, що покращує теплообмін і збільшує щільність теплового потоку при інших рівних умовах. Величина коливань трубок буде залежати від сили струму, жорсткості трубок і відстані між ними. Таким чином, компоновка експериментальної стрижневої збірки, навіть при однакових трубках, також може впливати на якість теплообміну, незалежно від інших умов.

Вплив виду електричного обігріву на критичні теплові навантаження детально досліджувався в [Дорощук], де оцінювалося через коливання температури поверхні каналу наступним чином.

Загальне рішення цього рівняння має вигляд:

![](data:application/x-msmetafile;base64,)

Аналізуючи рішення рівняння, автор пише: "... періодичне перевищення температури стінки при обігріві труби змінним струмом, буде тим більше, чим тонше стінка труби .... Можна зробити загальний висновок, що при обігріві експериментальної труби змінним струмом критичні теплові потоки будуть мати менші значення, ніж при обігріві постійним струмом. ... при товщині стінки 2 мм суттєвої різниці в значеннях критичних теплових потоків, отриманих при використанні постійного і змінного струму, не існує ". Для ілюстрації і підтвердження цього висновку використовуються графіки (рис.1). Згідно вид гріє струму не впливає на величину критичного теплового потоку (рис.1).

Однак, наведені автором графіки (рис. 1) можна інтерпретувати інакше, приймаючи до уваги, що в цих експериментах "постійний струм" - це ток, випрямленний діодами. А значить, це постійний по напрямку, але пульсуючий по амплітуді струм, між яким і змінним, з точки зору електродинамічної сили - немає різниці. Тоді ясно, чому на цих малюнках немає відмінності в результатах досвіду з обігріву каналу двома видами струму. Відмінності можна було б побачити, якби використовувався акумуляторний постійний струм.

Відсутність відмінностей в графіку на рис.1. можна пояснити з позицій електродинамічних сил. Зменшення товщини стінки при постійному діаметрі призводить до зменшення її радіальної жорсткості, а це повинно привести до зростання амплітуди радіальних коливань і збільшення коефіцієнта тепловіддачі з поверхні каналу. Однак зменшення товщини стінки каналу в порівняльному експерименті призведе до ослаблення електродинамічної сили (в зв'язку з ослабленням величини гріє струму) і відповідно амплітуди радіальних коливань з таких міркувань.

І електродинамічна сила і питомий тепловий потік пропорційні квадрату сила струму, а на тепломасообмін в обігріваючих струмом каналах більший вплив робить діаметр каналу, а не товщина стінки.

Підтвердженням цього висновку може бути, наприклад, той факт, що термоакустичні коливання рідко виявлялися в каналах великого діаметру.

![](data:application/x-msmetafile;base64,)

Рис.1.- Результати дослідів на трубах 8х2,0 мм, що обігріваються постійним (1) і випрямленою струмом (2), при тиску 16,7МПа.

Для кількісної порівняння відмінностей у величині критичного теплового потоку, отриманого на установках з різними видами обігріву, проведено огляд літератури, а дані, що цікавлять представлені в таблиці 1. Представлена ​​інформація обмежена тим, що автори переглянутих статей по кризі кипіння, часто не приділяють належної уваги відомостями про вид обігріву. Тому в таблиці представлені тільки ті дані, де вид обігріву було вказано авторами або відомий по інших робіт авторів.

Тут також слід вказати на роботу, де автори справедливо помічають відмінність навіть в крайніх випадках скелетних таблиць по критичним тепловим потокам в обігріваються трубах. Так, на прикладі таблиць ФЕІ-91 (Росія) і AECL-86 (Канада) показано, що неузгодженість в значеннях критичного теплового потоку становлять від 1,5 до 3 разів залежно від значень тиску, масової витрати або відносного паросодержания. Правда, автори пояснюють ці розбіжності особливостями розрахункових моделей і методик розрахунку, не аналізуючи можливі відмінності в умовах проведення експерименту з отримання реперних точок.

**Висновки:**

1) Представлені в табл. 1 дані можна розглядати як наукове протиріччя - дані за критичним тепловим потоком отриманим на паровому і електричному обігріві, розрізняються на порядок, причини цих відмінностей недостатньо висвітлені в сучасній науковій літературі;

2) При кипінні води на зволіканні малого діаметра, що обігрівається змінним струмом, не виявлено ділянки з падінням q, характерного для плівкового кипіння. Цікаво, що подібна поведінка кривої кипіння відзначено і при вимушеному русі в трубках. Спроби перейти до плівкового кипіння на представленому стенді, приводили до перепалудроту при незмінному характері кривої кипіння. Ці експерименти в цілому підтверджують думку про те, що на тонких дротяних нагрівачах режим плівкового кипіння відсутня, або займає дуже вузький діапазон за значеннями теплового потоку.

**Список використаних літературних джерел**

1. Мак-Адамс В.Х. Теплопередача. — М.: Металлургиздат, 1961. — 686 с.

2. Розенов В. Пузырьковое кипение в большом обьеме // в кн. Теплопередача при низких температурах, под ред. У.Фроста. — М.: Мир. —1977. — с.122-160.

3. Хьюитт Дж. Критическая плотность теплового потока при кипении в условиях вынужденного движения // В сб.: Теплообмен. Достижения. Проблемы. Перспективы. Под ред. Б. С. Петухова. — М.: Мир, 1981. — С. 7-73

4. Смолин В. И., Поляков В. К. Критические тепловые потоки при кипении теплоносителя в стержневых сборках // В кн.: Теплообмен 1978. Советские исследования. – М.: Наука, 1980. — С. 35–43.

5. Потехин С. А. Исследование теплообмена и кризисов при кипении гелия. — Автореф. соис. … канд. техн. наук. (теор. основы теплотехн.) — М.: МЭИ. — 1981. —18 с.

6. Дорощук В. Е. Кризисы теплообмена при кипении воды в трубах. — М.: Энергоатомиздат, 1983. — 120 с.

7. Кутателадзе С. С. Теплопередачи при конденсации и кипении. — М.– Л.: Машгиз, 1952. — 231 с.