

Тема 27. ТЕПЛООБМЕН ПРИ КИПЕНИИ

п.1. Общие представления о кипении
п.2. Критический радиус пузырька
п.3. Динамика кипения и отрывной радиус
п.4. Кривые кипения

п.5. Кризис теплоотдачи при кипении
п.6. Развитый режим пузырькового кипения
п.7. Теплоотдача при кипении в условиях вынужд. конвекции
п.8. Установление режима кипения при протекании теплоносителя в трубе

п.1. Общие представления о кипении

Опр. Кипение – процесс парообразования внутри жидкости (образование раздела фаз в объеме жидкости).

Жидкость закипает если давление насыщенного пара при заданной температуре жидкости выше внешнего давления жидкости $P_{нас}(T_{liq}) > P_0$. Или также

$$T_{liq} > T_{нас}(P_0).$$

Вспомним связь между температурой и давлением насыщения задается кривой насыщения, см. рис. (кривая равновесия жидкость – газ = кривая насыщенного пара; кривая равновесия твердое тело – газ = кривая сублимации)

Вспомним, уравнение Клапейрона -Клаузиуса задает связь между приращением температуры, давления, изменением удельного объема при равновесном фазовом переходе и энергией фазового перехода.

$$\frac{dp}{dT} = \frac{H_L}{T\Delta v}.$$

При нормальном атмосферном давлении **удельная теплота** парообразования **воды** $H_L = 2258$ кДж/кг, а температура кипения **воды** составляет 100°C . При увеличении давления до 100 атм., **теплота** парообразования снижается до 1315 кДж/кг.

∃ 2 режима кипения: 1) пузырьковый режим; 2) пленочный режим.

Пузырьковый режим \leftrightarrow пузырьки рождаются и растут на поверхности нагрева при:

- А) подводе тепла и наличии благоприятных условий (шероховатости, впадины, перегрев);
- В) при резком снижении давления (сбросе давления).

Теплота отводится от поверхности в виде:

- 1) конвективных потоков нагретой жидкости;
- 2) теплоты фазового перехода (парообразования).

$$Q_{поверхн} = Q_{конв}^{\Delta T} + Q_{парообразования}$$

Причем $Q_{конв}^{\Delta T} \gg Q_{парообразования}$ (экспериментально установленный факт).

Парообразование интенсифицирует конвекцию за счет принудительного движения жидкости вблизи поверхности.

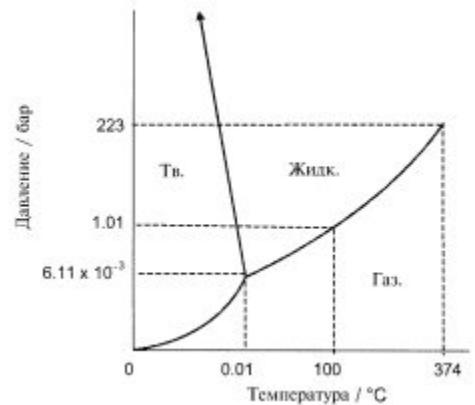
Пленочный режим \leftrightarrow на поверхности нагрева образуется *сплошная пленка* пара, периодически отрывающаяся в объем жидкости. (Т.е. отдельные пузырьки не обнаруживаются, а сливаются в большие двумерные образования).

Поверхность большую часть времени *изолирована* от основной массы жидкости слоем пара, поэтому тепловой поток ниже, чем при пузырьковом кипении

$$Q_{поверхн}^{пузырь} \gg Q_{поверхн}^{пленка}$$

Вопрос. При $T \sim 1000$ С интенсивность пленочного и пузырькового режима начинают сравниваться. Почему? (излучение)

Режим кипения определяется:



- 1) плотностью подводимого потока теплоты $q_{поверх}$;
- 2) свойствами жидкости ($\rho, \lambda, c, \nu, \sigma$ и др.);
- 3) гидродинамикой потока $\bar{w}(r, t)$.

С т.з. физики процесса кипения **интенсивность теплообмена** (коэф. теплоотдачи α зависит от: А) самого процесса возникновения пузырьков и условий их отрыва от поверхности и может быть оценена через такие параметры как $R_{кр}$ - критический радиус пузырька, $R_{отр}$ - отрывной радиус пузырька, $1/\tau_{отр}$ - частота отрыва.

Б) температуры основного потока жидкости $T_{liq} > T_{нас}(P_0)$ или $T_{liq} < T_{нас}(P_0)$?.

В) Скорости движения жидкости w_{liq} ,

Г) Условий подвода теплоты $q_{нов} = const$ или $T_{нов} = const$?

Характерные значения $\alpha_{кин} \sim 2 \cdot 10^3 - 4 \cdot 10^4$, а при высоких давлениях $p \sim 10 - 100 \text{ атм} \rightarrow \alpha_{кин} \geq 10^5$

п.2. Критический радиус пузырька - зародыша газовой фазы

Термин «зародыш» пузыря (газовой фазы) подчеркивает некоторые специфические свойства пузыря на самой начальной стадии его образования, например нахождение его на границе поверхности, не полностью сформированный раздел фаз, нестационарность и неравновесность процесса образования новой фазы и т.д. Но для общих оценок и описания процесса можно использовать термин «первичный пузырь» или просто пузырь.

Опр. Критическим радиусом $R_{кр}$ называется - минимальный радиус зародыша пузыря в который может испаряться жидкость при заданном перегреве ΔT .

Из-за вогнутости поверхности раздела фаз давление пара над поверхностью жидкости в малом пузырьке отличается (выше) от давления над плоской поверхностью (которое фигурирует в диаграмме состояний) из-за

- 1) особенности молекулярного движения над искривленной поверхностью раздела фаз (поправка Томсона);
- 2) силы поверхностного натяжения (поправка Лапласа)

$$\bar{p}_{пар} = \bar{p}_{пар} + \frac{2\sigma}{R} \frac{\rho_{пар}}{\rho_{жидк} - \rho_{пар}} + \frac{2\sigma}{R} = \bar{p}_{пар} + \Delta p_{пар}$$

(попр. Томсона) (попр. Лапласа)

Задача. Определить значение поправки Томсона и поправки Лапласа для $r=10 \text{ мкм}$, $T=20 \text{ С}$?
Коэф. поверхностного натяжения воды $\sigma_{вода}=58,85 \cdot 10^{-3} \text{ Н/м}$.

Для механического равновесия пузырька требуется $P_{пар} = P_{жидк} + \Delta p_{пар}$, где

$$\Delta p_{пар} = \frac{2\sigma}{R} \frac{\rho_{пар}}{\rho_{жидк} - \rho_{пар}} + \frac{2\sigma}{R} = \frac{2\sigma}{R} \frac{\rho_{жидк}}{\rho_{жидк} - \rho_{пар}} \quad (4)$$

Т.е давление должно быть несколько выше равновесного при данной температуре или иными словами, необходим определенный перегрев ΔT относительно обычной равновесной температуры. Величину

Вопрос. Можно ли связь ΔT и Δp определить из графика кривой насыщения? Без ур-я Клапейрона-Клаузиуса?

перегрева найдем исходя из связи ΔT и Δp из уравнения Клапейрона-Клаузиуса

$$\frac{dp}{dT} = \frac{H_L}{T\Delta v} \Rightarrow \Delta T = \frac{T\Delta v}{H_L} \Delta p \Rightarrow \Delta v \Delta p = \left[\frac{1}{\rho_{пар}} - \frac{1}{\rho_{жидк}} \right] \cdot \Delta p = \frac{\rho_{жидк} - \rho_{пар}}{\rho_{пар}\rho_{жидк}} \Delta p \quad \text{и (4)} \Rightarrow$$

$$\Delta T = \frac{T}{H_L} \frac{\rho_{жидк} - \rho_{пар}}{\rho_{жидк}\rho_{пар}} \frac{2\sigma}{R} \frac{\rho_{жидк}}{\rho_{жидк} - \rho_{пар}} = \frac{T}{H_L} \frac{2\sigma}{R} \frac{1}{\rho_{пар}} \quad (5)$$

Отсюда определяется минимальный радиус при котором может осуществляться механическое равновесие пузыря при заданном

перегреве $\Delta T \Rightarrow R_{\min} = \frac{T}{H_L} \frac{2\sigma}{\Delta T} \frac{1}{\rho_{пар}}$.

ВЫВОДЫ:

- Первичные пузыри (зародыши) должны образовываться за счет других физических процессов, - флуктуации давления/плотности, гетерогенных химических процессов, как остатки от оторвавшихся пузырей...

Эксперимент по образованию пузырьков в нормированных углублениях показал, что температура перегрева была связана с размером сформированных каверн, сделан вывод о том, что после отрыва пузырька в кавернах остаются остатки паровой фазы, служащие для их последующего образования.

Реальные значения перегрева $\Delta T \sim 1-2$ К для металлических поверхностей; $\Delta T \leq 50$ К для полированного стекла.

Термины

При $R_{пузырь} > R_{крит}$ зародыш растущий (жизнеспособный). Число растущих (жизнеспособных) зародышей в системе растет с ростом перегрева ΔT .

п.3. Динамика кипения и отрывной диаметр пузыря

Стадии образования пузырей при кипении

А) первичный рост пузыря до отрывного диаметра $R_{отр} \quad \tau \sim 10^{-3}-10^{-2}$ сек.

Б) отрыв и всплытие пузырька, с замещением его места новой жидкостью $\tau \sim 1$ сек.

В) прогрев новой порции жидкости у поверхности нагрева

Г) рост нового пузыря из зародыша

Задача. Оценить время прогрева слоя жидкости из соображений размерности через коэфф. Температуропроводности. $\lambda_{воды}=0.68$ Вт/м/К, $C=1000$, $\rho=1000$

Отрыв пузыря определяется балансом 1) силы архимеда 2) сил поверхностного натяжения 3) гидродинамическим воздействием потока

Баланс сил без гидродинамического воздействия \Rightarrow

$$\sigma d [H] \approx (\rho_{жидк} - \rho_{газ}) g V [H] \Rightarrow$$

$$d_{отр} \sim \frac{(\rho_{жидк} - \rho_{газ}) g d_{отр}^3}{\sigma} \Rightarrow d_{отр} \sim \sqrt{\frac{\sigma}{(\rho_{жидк} - \rho_{газ}) g}}$$

На практике

$$d_{\text{отр}} = 0.02\theta \sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho_{\text{жидк}} - \rho_{\text{газ}})}}$$

Где θ – угол смачивания в градусах.

Заметим, угол смачивания отсчитывают «от поверхности через жидкость», см.рис. Si $\theta < 90$ – смачиваемая поверхность, $\theta > 90$ – несмачиваемая.

Частота отрыва пузырьков

$$f_{\text{отр}} \sim \frac{\text{const}}{d_{\text{отр}}} \sim 10 \text{ сек}^{-1}$$

Задача. Оценить отрывной диаметр пузырька пара.
 $\theta = 50$ град,
 $\sigma = 58,85 \cdot 10^{-3}$ Н/м.

В целом, ab initio теории теплоотдачи при кипении заданной жидкости на заданной поверхности отсутствуют. Пользуются эмпирическими кривыми (т.н кривыми кипения) и критериальными зависимостями.

п.4. Кривые кипения

Эмпирические данные о теплопередаче при кипении удобно представлять в виде «кривых кипения», - зависимостей коэфф. Теплоотдачи от плотности потока при условии большого объема на плоской горизонтальной поверхности (стандартные условия, если не указано иное).

Стрелки представляют изменение α при увеличении и уменьшении q и ΔT .

$$\alpha \equiv \frac{q}{\Delta T}$$

ОА - пузырьковое кипение, $q_A = 8,3 \cdot 10^5$ (для воды) – первая критическая плотность потока

АГ – срыв на пленочное кипение, $q = \text{const}$, α - падает, ΔT - растет

БД – пленочное кипение

БС – возврат к пузырьковому кипению, $q_A = 2 \cdot 10^5$ (для воды) – вторая критическая плотность потока

АБ – сосуществование пленочного и пузырькового режимов

Д – справа от Д начинает сказываться теплообмен излучением, α - растет.

Критическая плотность теплового потока – максимальная плотность потока теплоты в условиях большого объема в точке А кривой кипения.

Срыв на пленочный режим как правило нежелателен, т.к. из-за резкого падения α может произойти перегрев и порча теплообменника

Задача. Оценить температуру при которой вклад излучения сравнивается с теплоотдачей при пленочном кипении? ($q=2 \cdot 10^5$)
- с максимальной теплоотдачей при пузырьковом кипении? ($q=8 \cdot 10^5$)

В сжатом (малом) объеме критическая плотность потока может быть выше, чем в большом объеме. Критерий сжатого потока (малого объема) $d \sim 10 d_{отр}$.

Для аппроксимации (режим пузырькового кипения) часто используют степенные формулы

$$\alpha_{кин} = C \cdot q^{0.7}$$

п.5. Кризис теплоотдачи при кипении

Механизм перехода от пузырькового к пленочному кипению (кризис теплоотдачи):

- по мере перегрева увеличивается число центров парообразования;
- при достижении предельной плотности растущих пузырьков поступление жидкости к поверхности блокируется;
- пар оттесняет жидкость и теплоотдача резко падает;
- небольшие объемы жидкости попадающие на поверхность взрывообразно отбрасываются .

Оценим $q_{кр}$. Критерий слияния пузырьков в пленку.

Используем модель вдувания воздуха через пористую горизонтальную стенку.

Напор вдуваемого газа $\rho_2 w_2^2$. Оценим напор, при котором пузырьки сольются.

Работа на оттеснение слоя жидкости $A = \rho g h = (\rho_{жс} - \rho_2) g \cdot d_{отр} \rightarrow A = (\rho_{жс} - \rho_2) g \cdot \sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho_{жс} - \rho_2)}} \rightarrow$

$$A = (\rho_{жс} - \rho_2) g \cdot \sqrt{\frac{\sigma}{(\rho_{жс} - \rho_2) g}} = \sqrt{(\rho_{жс} - \rho_2) g \sigma}$$

Условия слияния пузырьков определим некоторым значением отношения напор/ работа оттеснения

$$\frac{\rho_2 w_2^2}{\sqrt{(\rho_{жс} - \rho_2) g \sigma}} = const .$$

Взяв квадратный корень из уравнения определим критерий устойчивости пузырькового кипения

$$K \equiv \frac{\sqrt{\rho_2 w_2}}{\sqrt[4]{(\rho_{жс} - \rho_2) g \sigma}} .$$

Критический поток соответственно определится через K , используя $w_{нар} = \frac{q}{H_L \rho_{нар}}$:

$$q_{кр} = K \cdot \frac{\sqrt[4]{(\rho_{жс} - \rho_2)g\sigma}}{\sqrt{\rho_2}} H_L \rho_2 = K \sqrt[4]{(\rho_{жс} - \rho_2)g\sigma} H_L \sqrt{\rho_2} .$$

Характерное значение К для воды К=0.13. Оно зависит от:
 А) угла наклона (для вертикальных поверхностей - меньше)
 Б) объема
 В) материала и шероховатости поверхности и др.

Задача. Оценить значение критического теплового потока для воды при давлении 10 атм.

п.6. Развитый режим пузырькового кипения

Опр. Развитым наз. режим при котором доля теплоты переносимая естественной конвекцией пренебрежимо мала по сравнению с долей, обусловленной пузырьковым кипением (~ единицы %)

Поскольку основная доля теплоты передается конвективно (через омывающую жидкость) (установлено экспериментально), то будем использовать критериальную зависимость $Nu = f(Re, Pr)$ как для вынужденной конвекции.

Известно, что α не зависит от размеров поверхности нагрева и размеров камеры если $d \sim 10 d_{отр}$. Это и есть случай кипения в большом объеме

Определим масштабы для обобщенных переменных этого процесса.

Масштаб длины строим по отрывному диаметру пузыря $\rightarrow d^* = \sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho_{жидк} - \rho_{газ})}}$.

Масштаб скорости – скорость пара, оцененная по тепловым условиям на границе

$$-\lambda \frac{dT}{dn} = q = H_L \rho_{пар} u_{пар} \rightarrow u_{пар} = \frac{q}{H_L \rho_{пар}}$$

$$\text{Тогда } Re^* = \frac{q}{\mu_{жидк} H_L} \sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho_{жидк} - \rho_{газ})}}, \quad Nu^* = \frac{\alpha}{\lambda_{жидк}} \sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho_{жидк} - \rho_{газ})}}$$

Пример критериальной формулы для теплоотдачи при кипении (Розенау 1961 г.)

$$Nu^* = \frac{1}{C} Re_{кин}^{0.667} Pr_{кин}^{-0.7}$$

C – зависит от угла смачивания, типа поверхности, типа жидкости. Для системы вода – медь C=0,013.

Задача. Рассчитать α по формуле Розенау. Если $\mu_{воды} = 1 \cdot 10^{-3}$ Па·с, $q = 5 \cdot 10^5$ Вт/м², $H_L = 2258$ кДж/кг, $\sigma_{воды} = 58,85 \cdot 10^{-3}$ Н/м

Другая формула (Кутепов Стерман 1986)

$$Nu^* = C (Pe^* K_t^{0.63} K_b^{0.5})^n$$

Где $Pe^* = \frac{q d_{отр}}{H_L q_{газ} \kappa}$ - Пекле для парообразования

Задача. Рассчитать α по формуле Кутепова Стермана. $\mu_{воды} = 1 \cdot 10^{-3}$ Па·с, $q = 5 \cdot 10^5$ Вт/м², $H_L = 2258$ кДж/кг, $\sigma_{воды} = 58,85 \cdot 10^{-3}$ Н/м

$w_{пар} = \frac{q}{H_L q_{газ}}$ - скорость пара (сколько метров кубических с единицы поверхности в секунду)

$$K_t = \frac{(H_L q_{газ})^2 d_{отр}}{T c_p \sigma \rho_{жидк}} -$$

$$K_b = \frac{H_L}{gd_{\text{опр}}} - \text{безразмерная энергия фазового перехода.}$$

Для криогенных жидкостей формулы усложняют, включают температурную зависимость теплофизических свойств от T .

п.7. Теплоотдача при кипении в условиях вынужденной конвекции

В данных условиях взаимодействуют конвективная турбулентность и турбулентность (пульсации скорости и плотности) связанная с кипением. Влияние двух процессов нелинейно (не могут быть рассмотрены аддитивно).

Искомый коэффициент α зависит и от скорости потока (как при конвекции) и от теплового потока (как при кипении). Характер взаимодействия представлен на рис.

На рис. кривая 1 – свободная конвекция, 2,3,4 – вынужденная конвекция в трубе, где $w_2 < w_3 < w_4$

Задача не поддается аналитическому решению и как правило, коэффициент теплоотдачи находится при помощи эмпирических или полуэмпирических формул.

Модель Кутателадзе

$$\frac{\alpha}{\alpha_0} = \sqrt[n]{1 + \left(\frac{\lambda_{00}}{\lambda_0}\right)^n}$$

Где α - искомый коэфф. Теплоотдачи при конвекции и кипении;
 α_0 – коэфф. теплоотдачи при вынужденной конвекция *без кипения*;
 α_{00} – коэфф. теплоотдачи *при развитом кипении*.

Задача. Записать рабочую формулу для α используя критериальные формулы предыдущего раздела.

п.8. Установление режима кипения при протекании теплоносителя в трубе

На рисунке схема установления режима кипения при равномерном подводе теплоты.

$T_{\text{ж}}$ – средняя по сечению температура жидкости;

$T_{\text{ст}}$ – температура стенок трубы.

$$\alpha = \frac{q}{\Delta T}$$

ОА – кипения нет, жидкость греется конвективно;

АБ - поверхностное кипение;

ОБ – температурный напор постоянный (кипение существенно не влияет на интенсивность)

БВ - температурный напор падает → кипение существенно влияет на теплоотдачу;

Правее В - начало развитого кипения (теплообмен считается по формулам развитого кипения)

Левее Б - теплообмен считается по формулам конвекции