Пленочное кипение капли над горячей поверхностью (эффект Лейденфроста)

Теоретическая часть

Про пузырьковое и пленочное кипение (Саранин)

\noindent Принято выделять два основных режима кипения: пузырьковый и пленочный. Пузырьковый режим нам хорошо известен: например, при кипячении пленочной воды в кастрюле или колбе на дне образуются, растут и всплывают отдельные пузыри. При пленочном кипении образуется сплошная пленка пара. Возникает пленочное кипение только при достаточно больших удельных тепловых потоках. В частности, при кипении в большом объеме воды («большой объем» означает, что его характерные размеры много больше характерного размера пузырьков) критическое значение удельного теплового потока составляет $q\_{\*} \approx 10^6 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$. Следует отметить сразу, что переход от одного режима к другому носит черты кризисного, порогового явления. Черты кризиса заключаются, например, в том, что при возникновении пленочного кипения резко (в 10 и более раз) ухудшается передача тепла от нагревающей поверхности к жидкости.

\medskip

Про эффект Лейденфроста

\noindent Явление пленочного кипения капли над горячей поверхностью называется эффектом Лейденфроста. При контакте с телом значительно более горячим, чем точка кипения жидкости, создаётся изолирующий слой пара, который предохраняет жидкость от быстрого выкипания.

\medskip

КАРТИНКА ИЗ ВИКИПЕДИИ Поведение воды на горячей плите. На графике показана зависимость теплопередачи (потока) от температуры. Эффект Лейденфроста возникает после переходного кипения.

\noindent Основная идея теории такая: с нижней поверхности капли происходит интенсивное испарение, и капля висит на паровой подушке, не касаясь горячей поверхности, аналогично тому, как зависает автомобиль на воздушной подушке.

РИСУНОК

\medskip

\noindent Итак, пусть над горячей поверхностью повисла, т.е. находится в состоянии равновесия, капля массой $m$ (Рис. ). Равновесие капли как целого означает

$$N = mg$$

\noindent где $N$ — сила реакции пара под каплей. Будем наблюдать за равновесием в течение времени, которое гораздо меньше времени испарения всей капли. Тогда приближенно можно считать все величины постоянными. Заметим, что нижняя поверхность капли почти плоская, как и твердая горячая поверхность (это можно пронаблюдать на опыте). Ввиду этого, объем пара под каплей будем считать цилиндрическим, с радиусом $r$ и высотой $h$. Наша задача состоит в том, чтобы ответить, например, на вопрос: начиная с какой температуры поверхности возможно такое равновесие и от чего зависит эта температура?

\medskip

\noindent Пусть избыточное давление пара под каплей равно $\Delta p = p\_{\text{п}} – p\_{\text{а}}$ ($p\_{\text{а}}$ - атмосферное давление). Это давление $\Delta p$ создает в вертикальном направлении силу, уравновешивающую силу тяжести капли, а в горизонтальном направлении — силу, приводящую к вытеканию пара из-под капли со скоростью $v$. Вытеканию препятствует сила трения пара, обусловленная его вязкостью. Тем самым можем записать вместо (ПРЕД. ФОРМУЛА)

$$ N = \Delta p \pi r^{2} = mg. $$

\noindent Рассмотрим теперь горизонтальные силы. В толще пара мысленно выделим цилиндр с горизонтальной осью длиной $r$ и площадью основания $\Delta S = \frac{1}{4} \pi h^{2}$. Давления на концах цилиндра — $p\_{\text{п}}$ и $p\_{\text{а}}$. Тогда результирующая сила, действующая на цилиндр, будет равна

$$F\_п = (p\_{\text{п}} - p\_{\text{а}}) \Delta S = \Delta p \Delta S = \Delta p \frac{1}{4} \pi h^{2} .$$

\noindent А по определению силы внутреннего трения в жидкости или газе, она равна

$$F\_c = \eta \frac{dv}{dz} \Delta S\_\text{бок}, $$

\noindent где $\eta$ — вязкость газа (пара), $\Delta S\_\text{бок}$ — боковая поверхность горизонтального цилиндра, так как трение осуществляется на ней. Приближенно можно считать

$$\frac{dv}{dz} = \frac{v}{h}$$

\noindent Кроме того, $\Delta S\_\text{бок} = \pi r h$ ($h$ — диаметр цилиндра, $r$ — его длина). Учитывая эти формулы и приравнивая (1.71) и силу сопротивления (1.72), получим

$$\Delta p = 4 \eta \frac{vr}({h}^2}. $$

\noindent Исключив перепад давления $\Delta p$ из (1.70) и (1.73), получим следующее выражение для скорости пара:

$$v = \frac{mgh^2}{4 \pi \eta r^3} .$$

\noindent С другой стороны, количество вытекающего пара (а следовательно, и его скорость) определяется скоростью испарения жидкости. Допустим, что в единицу времени к единице площади нижней поверхности капли от горячей поверхности подводится $q$ тепла (удельный тепловой поток). Будем считать, что все это тепло идет на парообразование. Обозначим удельную теплоту парообразования $\varkappa$, в единицу времени будет испаряться количество жидкости

$$\Delta m\_t = \frac{q \pi r^2}{\varkappa}$$

\noindent Если пренебречь обратным процессом конденсации пара, то, по закону сохранения массы, столько же пара выйдет через боковую поверхность цилиндрического парового слоя. Очевидно, через единичную площадку, перпендикулярно ей, в единицу времени проходит количество пара, равное $\rho\_{\text{п}} v$ ($\rho\_{\text{п}}$ — плотность пара). Тогда через всю боковую поверхность парового слоя $S = 2 \pi \rho h$ за секунду пройдет количество пара

$$ \Delta m\_t = \rho\_{\text{п}} v \cdot 2 \pi \rho h . $$

\noindent Приравнивая (1.75) и (1.76), найдем связь удельного теплового потока и скорости истечения пара:

$$ v = \frac{qr}{2 \varkappa \rho\_{\text{п}} h . $$

\noindent Из (1.74) и (1.77) находим величину удельного теплового потока, который необходимо подвести к капле, чтобы она висела на паровой подушке:

$$ q = \frac{mg \varkappa \rho\_{\text{п}} h^3}{2 \pi r^4 \eta} . $$

\noindent Зная тепловой поток, нетрудно найти температуру поверхности, при которой возможно явление Лейденфроста. Как известно, удельный тепловой поток связан с перепадом температур соотношением

$$ q\_z = - \lambda \frac{\partial T}{\partial z} ,$$

\noindent где $\lambda$ — коэффициент теплопроводности среды (пара), а знак «—» говорит о том, что тепло распространяется в сторону уменьшения температуры. В нашем случае (1.79) можно приближенно записать в виде

$$ q = \lambda \frac{\partial (T\_{\text{ст}} - T\_{\text{к}}}{\partial h} $$

Из (1.80) и (1.78) найдем

$$ T\_{\text{ст}} = T\_{\text{к}} + \frac{mg \varkappa \rho\_{\text{п}} h^4 }{2 \pi r^4 \eta} , $$

\noindent где T\_{\text{к}} — температура нижней поверхности капли, которую можно принять равной $\approx$ 100°С.

\noindent Итак, $m$ и $r$ легко если и не измерить, то оценить из опыта, а $\varkappa, \rho\_{\text{п}}, \eta, \lambda$ можно найти в таблицах.

\medskip

\noindent Измерим на опыте T\_{\text{ст}}, при которой становится возможным явление Лейденфроста. По формуле () найдем толщину прослойки пара $h$.

\medskip

Звезды

\noindent Как и всякая система в равновесии, капля может совершать колебания около положения равновесия. Для сферического равновесия может быть решена задача об определении форм собственных колебаний капли. На рисунке показано несколько форм колебаний капли (их называют модами). Моды нумеруются. Первой модой (n = 1) колебаний сферы являются чисто радиальные колебания, соответствующие одинаковому во всех точках сферы увеличению (уменьшению) радиуса. Возможных мод колебаний бесконечно много. Реальное колебание представляет собой совокупность различных мод, но наблюдатель обычно видит одну доминирующую моду, которой соответствует наибольшая амплитуда. Например, наиболее часто можно увидеть вторую моду n = 2, но можно пронаблюдать на опыте и 5—6 первых мод.

\medskip

\noindent Оценим частоту колебаний основной моды теоретически и экспериментально.

\medskip

\noindent Оценку частоты колебаний капли можно произвести, используя теорию размерностей. Очевидно, что частота колебаний может зависеть только от плотности жидкости $\rho$, коэффициента поверхностного натяжения $\varsigma$, радиуса капли $r$. Тогда можно описать с точностью до постоянного множителя

$\varomega \approx \rho^m \varsigma^n r^k . $

\noindent Размерность правой части получается следующей:

$ {\text{кг}}^{n+m} {\text{м}}^{k-3m} {\text{с}}^{-2n} . $

\noindent Размерность левой - ${\text{с}}^{-1}$ . Приравнивая размерности, получим:

\begin{equation\*}

\begin{cases}

   -2n = -1,\text{ } n = 1/2\\

   n + m = 0, \text{ } m = -1/2\\

k – 3m = 0, \text{ } k = -3/2.

 \end{cases}

\end{equation\*}

\noindent Получаем

$\varomega \sim \sqrt{\frac{\varsigma}{\rho r^3}} .$

\noindent Точный результат для второй моды n = 2 таков:

$\varomega = \sqrt{\frac{8 \varsigma}{\rho r^3}} .$

ПРИМЕНЕНИЕ

В повседневной жизни и в быту

Интерес к этому явлению в настоящее время диктуется тем, что во многих технологических процессах приходится охлаждать горячие поверхности жидкостями. При этом, очевидно, может возникать явление Лейденфроста и оказывать решающее влияние на течение всего технологического процесса.

Применяется в струйных принтерах и ядерных реакторах

в быту: проверка утюга и паяльника на нагрев мокрым пальцем, проверка степени нагретости сковороды каплей воды, тушение мокрыми пальцами фитиля свечи

трюки: • При исполнении трюков с опусканием рук в расплавленный свинец. • При ходьбе по горячим углям. • При исполнении фокуса с выплёвыванием жидкого азота.

Как мешает на производстве

Эффект Лейденфроста может оказывать отрицательное действие в промышленности:

1) Уменьшение КПД нагревательной установки, вследствие недостаточной передачи тепла от перегретых нагревателей к жидкости.

2) Перегревание емкостей, в которых находится жидкость, может привести к их расплавлению с катастрофическими последствиями (взрыв паровых котлов).

Опыт

Исследование зависимости времени «жизни» капли воды от температуры поверхности

оборудование

Фотографии установки и разных мод

График с временем жизни капли

Пока температура поверхности меньше 100°C, время существования объекта неуклонно уменьшается и достигает 200 мс в предельной точке (точке кипения воды). При этой температуре капля непосредственно соприкасается с подложкой и закипает. Когда температура возрастает со 100 до 150°C, срок жизни капли за счет образования изолирующего слоя пара быстро растет. Максимальное время жизни капли определяет так называемую температуру Лейденфроста, индивидуальную для каждой жидкости. Также эта температура зависит от степени чистоты жидкости, качества поверхности, структуры и других факторов вплоть до того, каким образом капля была положена на подложку. В данном конкретном примере с водой она составляет около 150°C.

Звезды из кванта

Оценка частоты колебаний из саранина

Таблица с модами, экспериментальная оценка частоты колебаний

Выводы

Источники

Саранин В.А. Равновесие жидкостей и его устойчивость. Простая теория и доступные опыты.–М.:Институт компьютерных исследований, 2002.–144с

Уокер Дж. Как кипит вода? (Эффект Лейденфроста) // Квант.–1991.–№6.– С.33-35.

Голубев М., Кагаленко А. Капля на горячей поверхности // Квант.–1977.–№12.– С.28-19.

Лушков А., Лужков Ю. «Звезды» из водяной капли // Квант.–1978.–№7.– С.28.

Перельман Я.И. Знаете ли вы физику? – М.: Наука, 1992.–272с.

Теоретическая часть (Саранин)

Оценка толщины парового слоя, критичесий тепловой поток

В 2006 году было обнаружено, что на поверхности со специальным рельефом капля Лейденфроста способна совершать направленное движение.

Ученые из Политехнической школы и Лаборатории физики и механики неоднородных сред в Париже, экспериментируя с каплями этанола (рис. 3), решили более подробно исследовать описанное выше явление и установить истинный механизм возникновения движения капель. Результаты своих изысканий они представили в статье Leidenfrost on a ratchet в журнале Nature Physics. Для начала ученые сформулировали основные причины, которые могут индуцировать перемещение:

1) прежде всего, это уже описанная неоднородность радиуса кривизны капли, порождающая градиент лапласовского давления;

2) внутри капли могут существовать процессы переноса вещества от задней части к передней (волны), генерирующие движение капли;

3) спонтанные колебания капли из-за неоднородной толщины прослойки пара способны трансформироваться в кинетическую энергию направленного движения;

4) эффект Марангони: коэффициент поверхностного натяжения обладает температурной зависимостью, а потому возможная неравномерность температуры может спровоцировать его неоднородное распределение, а значит, и смещение капли (см. статью Optical levitation and transport of microdroplets: Proof of concept).

5) пока поверхность, на которой находится капля Лейденфроста, гладкая, пар равномерно и изотропно (одинаково во все стороны) вытекает из-под капли. Если же поверхность рифленая (как, например, на рис. 3), течение пара становится анизотропным, приобретая определенное направление. Изолирующая прослойка становится как бы двигателем на паровой тяге, инициирующим движение капли, а капля — чем-то вроде корабля на воздушной подушке.