

ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОС

В

ЯДЕРНО-

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ

УСТАНОВКАХ

ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОС В ЯДЕРНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ

Тема № 8

**Конденсация.
Кипение**

Конденсация – процесс превращения пара в жидкость. **03**

Происходит
В ОБЪЁМЕ **НА ПОВЕРХНОСТИ**

Гомогенная конденсация – конденсация чистого пара в объёме, если в нём отсутствуют центры конденсации.

Причина возникновения – переохлаждение пара относительно температуры насыщения.

Степень пресыщения – величина, характеризующая переохлаждение пара – отношение давления пара к давлению насыщения при температуре равной $\Delta T = T_{sat} - T_{steam}$:

$$\eta = \frac{P_{steam}(T_{steam})}{P_{sat}(\Delta T)} \quad .$$

Причина образования мельчайших капель – флуктуации плотности пара.

04

Если радиус капли, находящейся в термодинамическом равновесии с паром, достиг критического R_{crit} , капля становится зародышем жидкой фазы:

$$R_{crit} = \frac{2 \sigma T_{sat}}{r \rho_{fluid} \Delta T},$$

σ – коэффициент поверхностного натяжения, H/m^2 ;

r – удельная теплота испарения, $Дж/кг$.

По мере увеличения переохлаждения пара (то есть увеличения разности $\Delta T = T_{sat} - T_{steam}$ и/или отношения P/P_{sat}) R_{crit} уменьшается. Как следствие, увеличивается вероятность спонтанного образования капель.

Если образовавшаяся, вследствие флуктуации плотности пара, имеет радиус меньше критического – она после возникновения быстро испаряется.

Если образовавшаяся, вследствие флуктуации плотности пара, имеет радиус больше критического – она после возникновения растёт. Рост капли обусловлен конденсацией на её поверхности, притекающего к ней пара.

Конденсация на поверхности обычно начинается при небольшом переохлаждении (на $0.01 \div 0.05K$).

05

Взаимодействие конденсата с поверхностью определяется смачиваемостью, которая характеризуется краевым углом θ , отсчитываемым в сторону жидкости.

При $\theta < 90^\circ$ жидкость **смачивает** поверхность;

при $\theta > 90^\circ$ – жидкость **не смачивает** поверхность (рисунок 1).

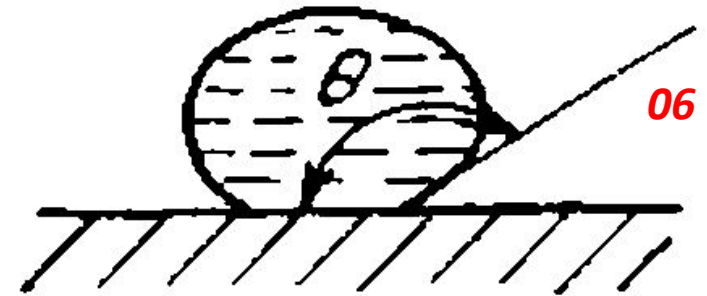
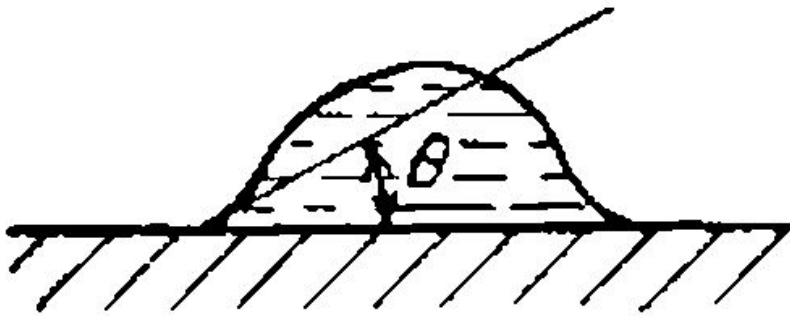
При конденсации **на смачиваемой поверхности** (рисунок 1а) **конденсат образует плёнку** – это так называемая **плёночная конденсация**.

При конденсации **на не смачиваемой поверхности** (рисунок 1б) **конденсат осаждается на поверхности в виде капель** – это **капельная конденсация**.

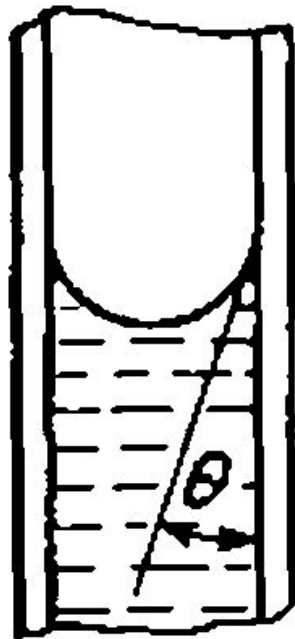
КОНДЕНСАЦИЯ НА ПОВЕРХНОСТИ

ПЛЁНОЧНАЯ

КАПЕЛЬНАЯ



А



Б

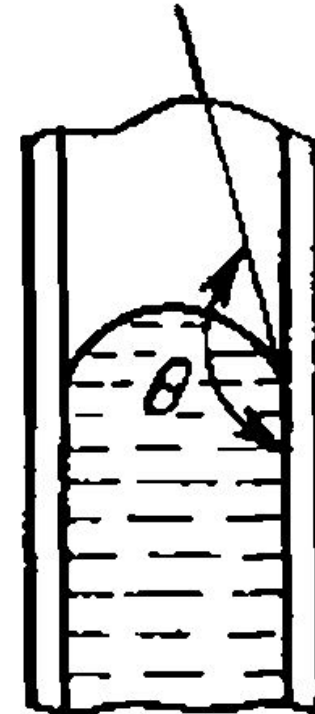


Рисунок 1 – Конденсация на поверхности:

А – смачиваемая поверхность ($\theta < 90^\circ$); **плёночная** конденсация;
Б – НЕсмачиваемая поверхность ($\theta > 90^\circ$); **капельная** конденсация.

В процессе конденсации удельный объём конденсирующегося вещества уменьшается.



Происходит интенсивный перенос массы из окружающей среды к месту конденсации.

При конденсации выделяется тепло фазового перехода (теплота конденсации).



Конденсация сопровождается переносом тепловой энергии.

ПО ХАРАКТЕРУ ДВИЖЕНИЯ ПАРА



**ПО ОТНОШЕНИЮ ТЕМПЕРАТУРЫ ПАРА
К ТЕМПЕРАТУРЕ НАСЫЩЕНИЯ**



Стадии превращения пара в жидкость (стадии фазового перехода)

1. Подвод пара к поверхности раздела фаз (механизмы – конвекция и диффузия).

Характеризуется нормальной к поверхности конденсации скоростью движения пара.

2. Собственно процесс фазового перехода.

Процесс заключается во взаимодействии молекул пара с поверхностью конденсации. Характеризуется коэффициентом конденсации – отношением количества молекул пара, присоединившимся к жидкости за единичный интервал времени через единичную площадку межфазной поверхности, к полному количеству молекул соприкасавшимся с рассматриваемым участком межфазной поверхности в течение названного интервала времени.

3. Отвод тепла, выделяющегося при конденсации.

Типичное распределение температур у вертикальной поверхности при плёночной конденсации показано на рисунке 2.

4. Отвод жидкости, скапливающейся на поверхности.

Режимы движения течения плёнки жидкости на вертикальной плоской поверхности рассмотрены на рисунке 3.

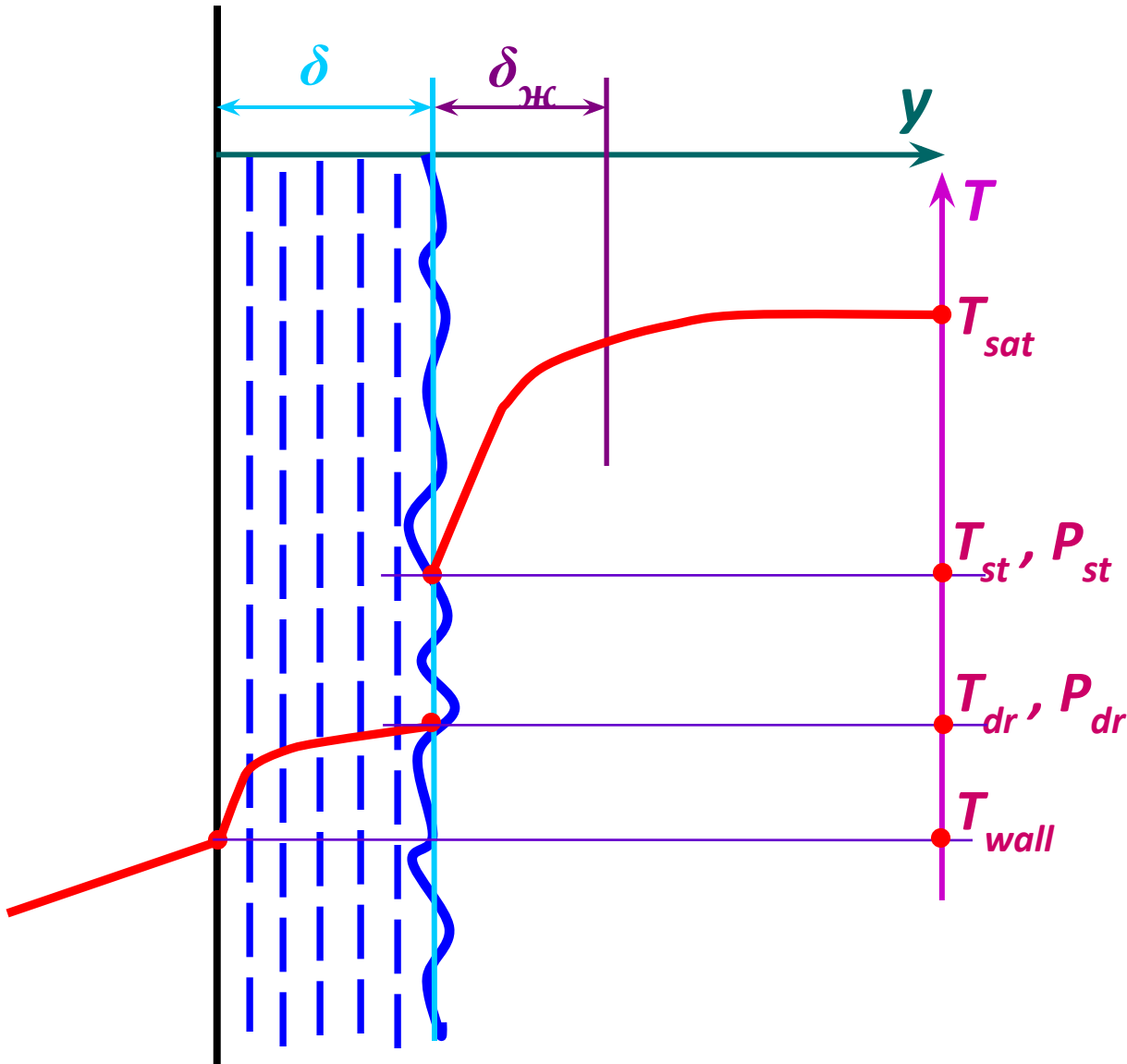
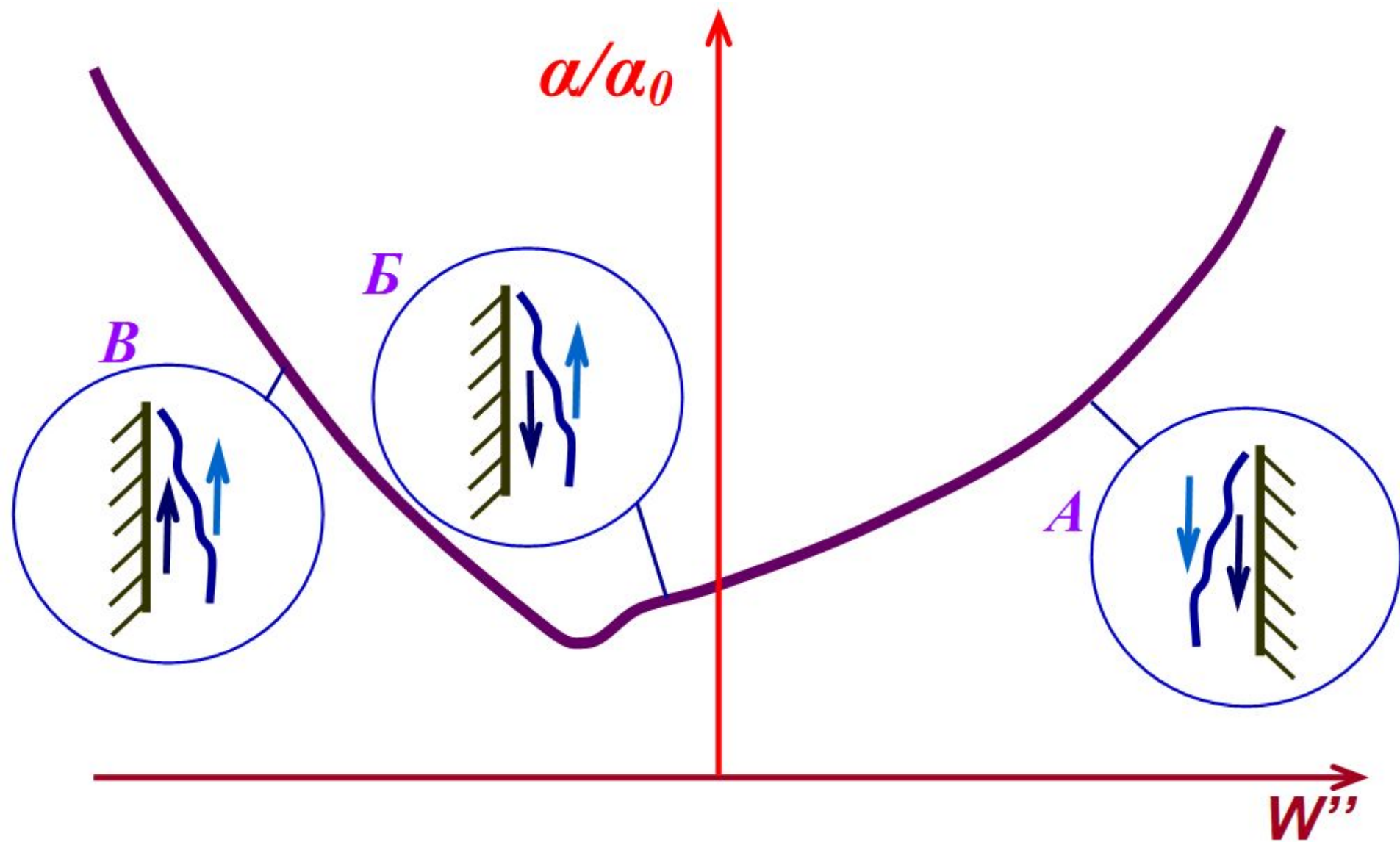


Рисунок 2 – Типичное распределение температур при плёночной конденсации насыщенного пара на плоской вертикальной поверхности.

T_{wall} – температура поверхности стенки; T_{dr} – температура поверхности плёнки конденсата; T_{st} – температура пара у поверхности плёнки; T_{sat} – температура насыщения; $\delta_{жс} = 10L$ – толщина прилежащего к плёнке слоя пара, в котором происходит основное изменение температуры от значения T_{st} до температуры насыщения.

Плёночная конденсация движущегося пара

11



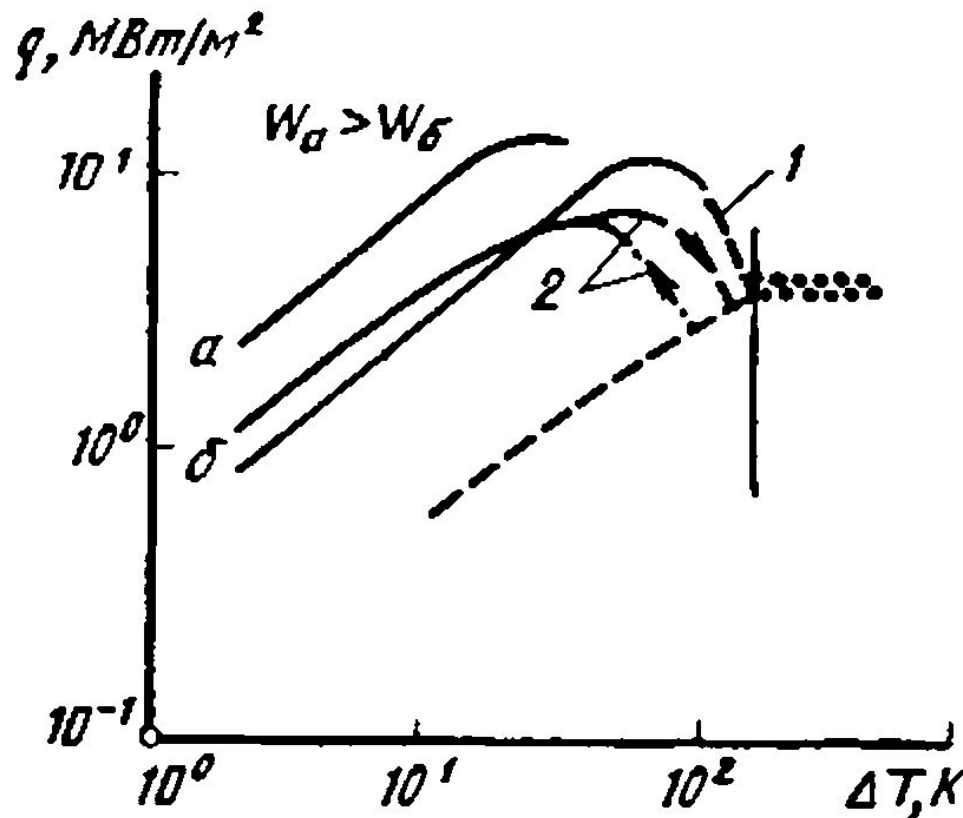
Движение пара оказывает динамическое воздействие на границу раздела фаз, ускоряя или замедляя движение плёнки жидкости.

12

А) Пар течёт **вниз** – скорость плёнки **увеличивается**, α **увеличивается**.

Б) Пар течёт **вверх** – скорость плёнки **уменьшается** (плёнка тормозится), возникает **волновой режим** течения плёнки, α **уменьшается**.

В) Пар течёт **вверх** с большой скоростью – вследствие возрастания силы трения на межфазной границе «плёнка_жидкости/пар» плёнка увлекается паром, в результате толщина плёнки уменьшается, поэтому α **растёт**.



С увеличением
переохлаждения
поверхности
изменяются режимы
теплообмена
(конденсации).

Кривые конденсации –
зависимости плотности теплового потока от степени
переохлаждения:

сплошные линии – капельная конденсация,

пунктирные линии – плёночная;

линии из «жирных» точек – конденсация на слое льда (ледниковый режим);

1 – режим конденсации в котором скорость конденсации превышает
скорость отрыва капель,

2 – переходной режим конденсации

Капельная конденсация – один из видов теплообмена с высоким коэффициентом теплоотдачи.

Происходит на несмачиваемых поверхностях.

Центрами конденсации являются **микровпадины поверхности**.

Характерный размер центров конденсации определяется соотношением:

$$R_{\text{drop}} = \frac{2 \sigma T_{\text{sat}}}{r \rho_{\text{fluid}} \Delta T},$$

где $\Delta T = T_{\text{sat}} - T_{\text{surf}}$ – разность температуры насыщения и температуры поверхности конденсации (твёрдой стенки или слоя жидкости).

- 1) При соприкосновения пара с поверхностью конденсации образуется (в начальной стадии) абсорбционный слой.
- 2) Затем образуется тонкая (доли мкм) плёнка жидкости. Молекулы на её поверхности притягиваются друг к другу тем сильнее, чем тоньше плёнка.
- 3) Плёнка разрывается – её фрагменты образуют капли.
- 4) Капли растут; сливаются.
- 5) В какой-то момент скатываются под действием силы тяжести или срываются потоком пара.

Условие существования капельной конденсации:

$$\Delta T > \Delta T_{\text{drop}} = \frac{2 \sigma T_{\text{sat}}}{r \rho_{\text{fluid}} R_{\text{drop}}} .$$

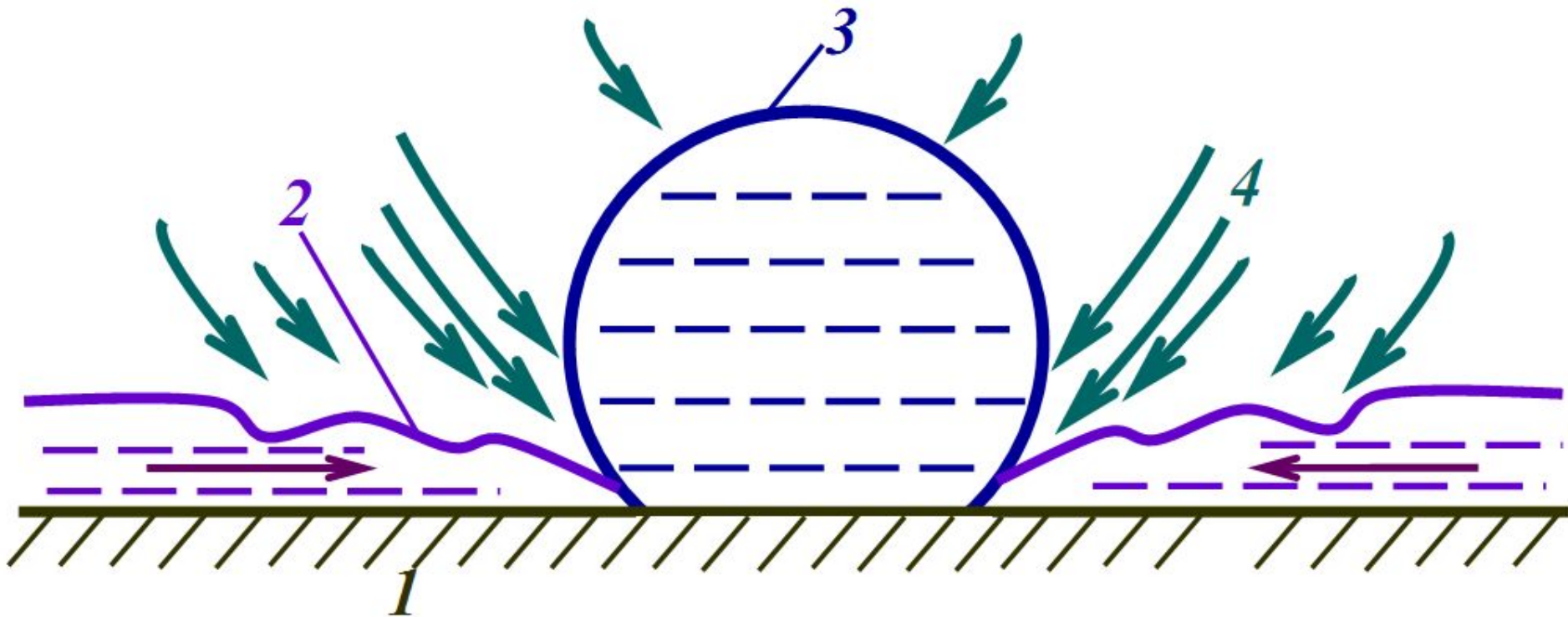


Схема процесса капельной конденсации:

1 – поверхность конденсации;

2 – микроплёнка;

3 – капля;

4 – основной поток конденсирующегося пара.

Термическое сопротивление при капельной конденсации меньше термического сопротивления при плёночной конденсации:

17

$$R_{\text{капельная}} < R_{\text{плёночная}} .$$

То есть, коэффициент теплоотдачи при капельной конденсации больше, чем коэффициент теплоотдачи при плёночной конденсации:

$$\alpha_{\text{капельная}} > \alpha_{\text{плёночная}} .$$

$$\alpha_{\text{капельная}} \sim 5 \cdot 10^4 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}) \approx (10 \div 20) \cdot \alpha_{\text{плёночная}} .$$

Причины:

- 1) капли имеют большую поверхность контакта с паром;
- 2) движение микроплёнки конденсата, собирающегося в капли.

Практическое применение ограничено тем, что **капельная конденсация возникает лишь на несмачиваемых поверхностях при низком давлении паров.**

Пусть R_λ – термическое сопротивление капли, $(\text{м}^2 \cdot \text{К})/\text{Вт}$.

Суммарное термическое сопротивление при капельной конденсации есть сумма 3-х слагаемых:

$$R_{\text{капельная}} = \frac{1}{\alpha} = \frac{1}{\Phi_K} \left(R_\phi + R_{\lambda, \alpha_\phi \rightarrow \infty} + \Delta R_\lambda \right),$$

где Φ_K – доля поверхности, занятая каплями;

R_ϕ – термическое сопротивление фазового перехода,
 $(\text{м}^2 \cdot \text{К})/\text{Вт}$;

$R_{\lambda, \alpha_\phi \rightarrow \infty}$ – термическое сопротивление капли, $(\text{м}^2 \cdot \text{К})/\text{Вт}$;

ΔR_λ – прирост термического сопротивления капли, обусловленный увеличением термического сопротивления фазового перехода, $(\text{м}^2 \cdot \text{К})/\text{Вт}$.

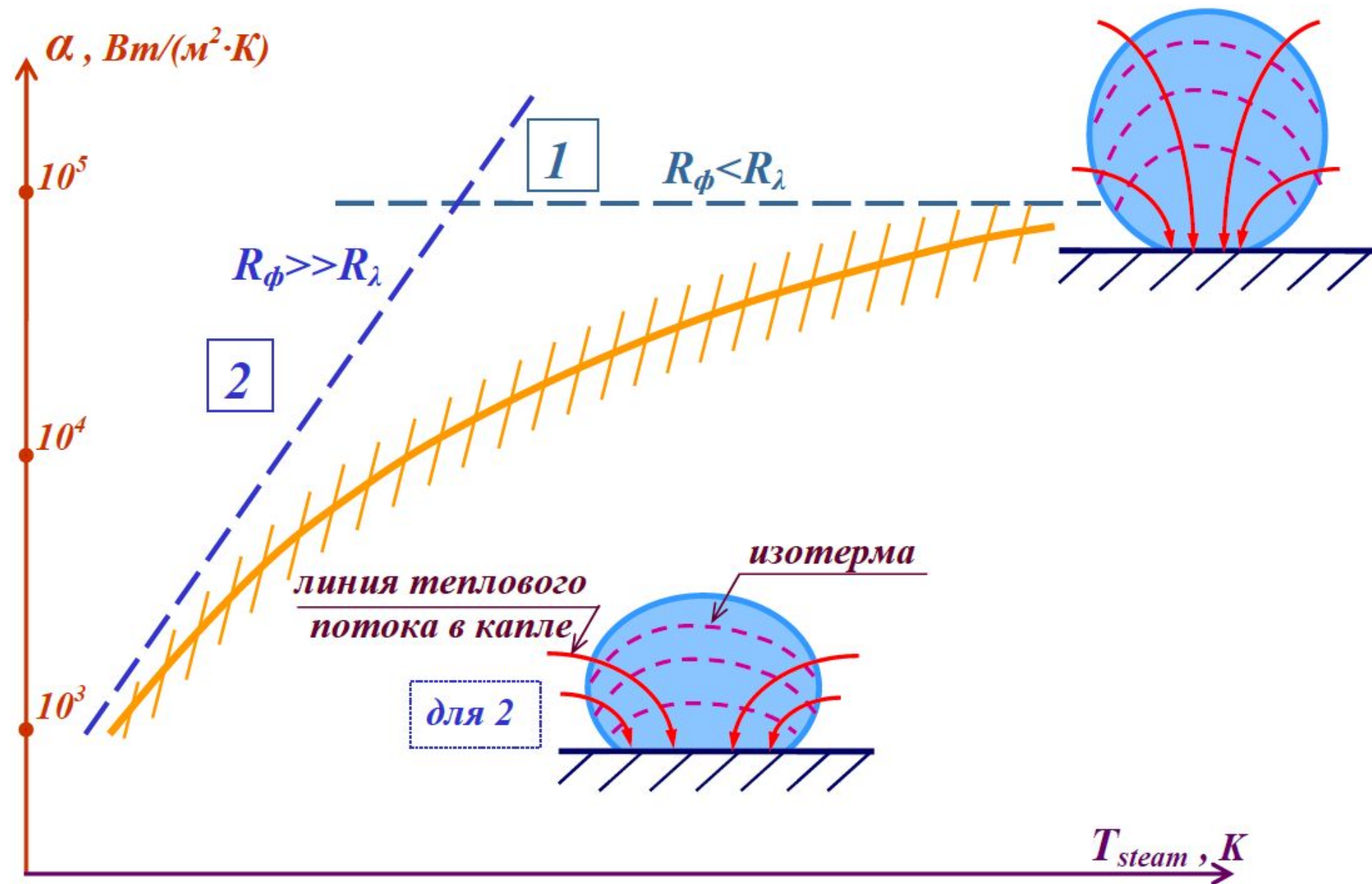
Два предельных случая.

Область «1» – температура и давление насыщенного пара достаточно высоки. Поэтому теплообмен определяется, в основном, термическим сопротивлением капли:

$$R_{\lambda, \alpha_{\phi}} = \frac{\bar{d}}{0.834 \lambda_{\text{ж}}} \quad .$$

Область «2» – температура и давление насыщенного пара достаточно низки. Поэтому теплообмен определяется, в основном, термическим фазового перехода:

$$R_{\lambda, \alpha_{\phi}} = \alpha_{\phi} \Phi_{\text{к}} \quad .$$



ПЛЁНОЧНАЯ КОНДЕНСАЦИЯ

Теплообмен определяется, в основном, термическим сопротивлением жидкой плёнки.

Факторы, определяющие
термическое сопротивление жидкой плёнки:



Силы, взаимодействие которых определяет
характеристики движения плёнки
на смачиваемой поверхности



Режимы течения плёнки на вертикальной или наклонной поверхности

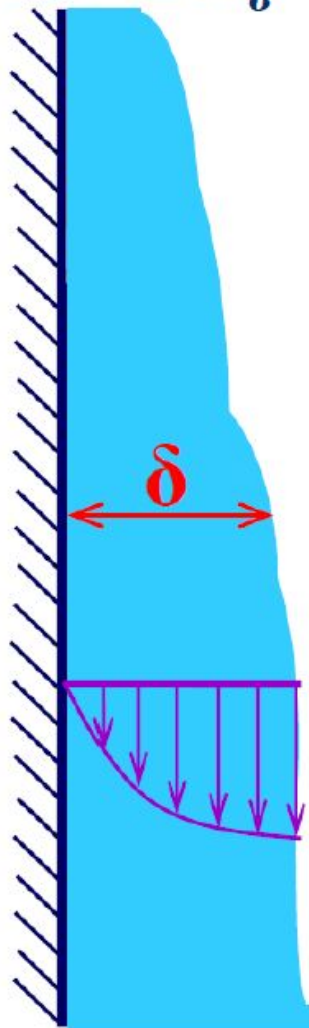
22

ламинарный

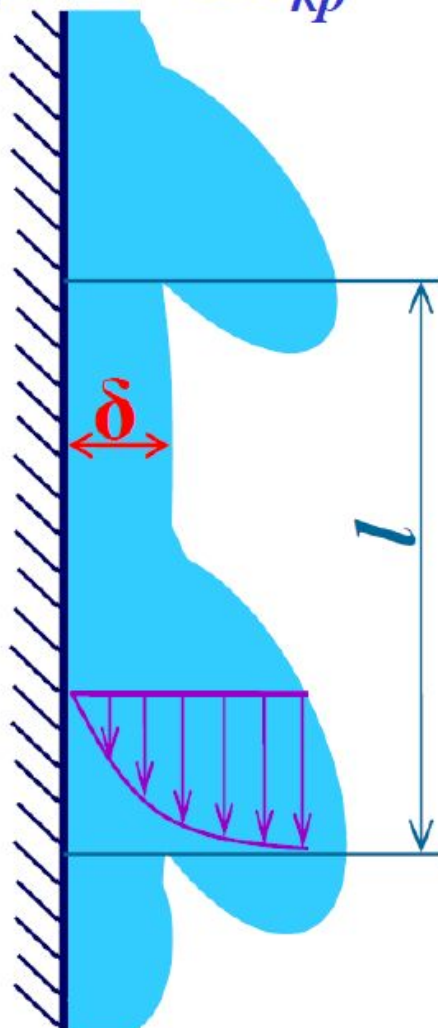
волновой

турбулентный

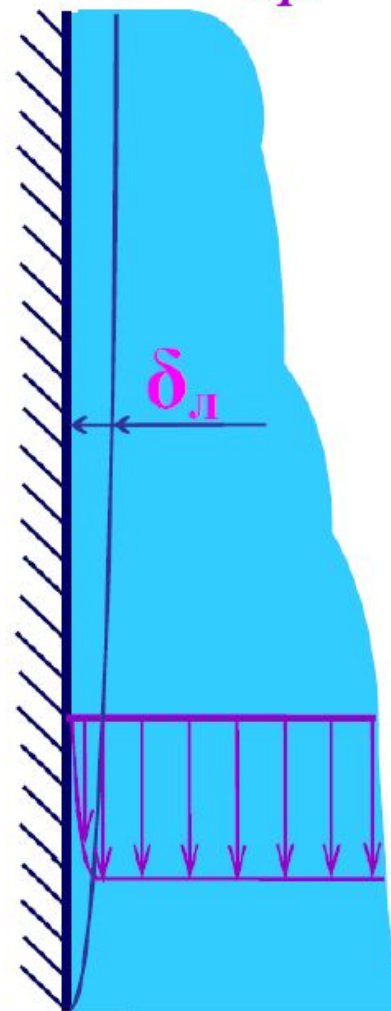
$$Re < Re_v$$



$$Re_v \leq Re < Re_{кр}$$



$$Re \geq Re_{кр}$$



ЛАМИНАРНЫЙ РЕЖИМ ТЕЧЕНИЯ ПЛЁНКИ

Рассмотрим конденсацию неподвижного сухого насыщенного пара на вертикальной поверхности, температура которой равна T_{wall} .

Теория этого процесса переноса тепла при ламинарном течении пленки конденсата создана Нуссельтом.

Полагаем *течение плёнки стационарным*.

Сделаем следующие *допущения*:

- 1) силы инерции малы по сравнению с силами тяжести и вязкости;
- 2) тепло через пленку передаётся только путём теплопроводности поперёк плёнки;
- 3) конвективный перенос и теплопроводность вдоль плёнки не учитываются;
- 4) температура внешней поверхности плёнки равна температуре насыщения – T_{sat} ;
- 5) физические параметры плёнки не зависят от температуры;
- 6) трение на границе «пар–жидкость» отсутствует;
- 7) поверхность плёнки гладкая и силы поверхностного натяжения малы.

ЛАМИНАРНО-ВОЛНОВОЙ РЕЖИМ ТЕЧЕНИЯ ПЛЁНКИ

Большая масса жидкости переносится в волнах.

Основное термическое сопротивление обусловлено тонкой плёнкой конденсата с «остаточной» толщиной δ_0 .

δ_0 практически не зависит от величины расхода конденсата.

Увеличение расхода приводит к уменьшению длины волн.

Как и при ламинарном течении: $\alpha = \lambda / \delta_0$.

При $Re=Re_*$ (граница развитого волнового режима средняя и остаточная толщина плёнки совпадают: $\bar{\delta}_0 = 1.44 Re^{1/3}$. 25
 Подставляя сюда значение $Re_* = 2.3 Ar_*^{1/3}$, получаем

$$\bar{\delta}_0 = 3.3 Ar_*^{1/15} .$$

Отсюда можно определить среднее значение коэффициента теплообмена для ламинарно-волнового характера течения плёнки:

$$\left(\frac{\alpha}{\lambda} \right) \left(\frac{v^2}{g} \right)^{1/3} = 0.527 Ar_*^{-1/15} .$$

При развитом волновом течении плёнки конденсата коэффициент теплообмена не зависит от геометрических размеров и является функцией только физических свойств жидкой плёнки. Область автомодельности охватывает диапазон $Re=200 \div 1 \cdot 10^3$.

Влияние волнового движения пленки и переменности физических параметров с температурой на коэффициент теплообмена можно учесть с помощью поправок к значению α :

$$\alpha = \alpha_0 \cdot \varepsilon_v \cdot \varepsilon_t .$$

ТУРБУЛЕНТНО-ВОЛНОВОЙ РЕЖИМ ТЕЧЕНИЯ ПЛЁНКИ («В»)

$Re_{кр} \approx 1600$ – режим течения плёнки становится турбулентным.

Увеличивается гидравлическое сопротивление течению плёнки.

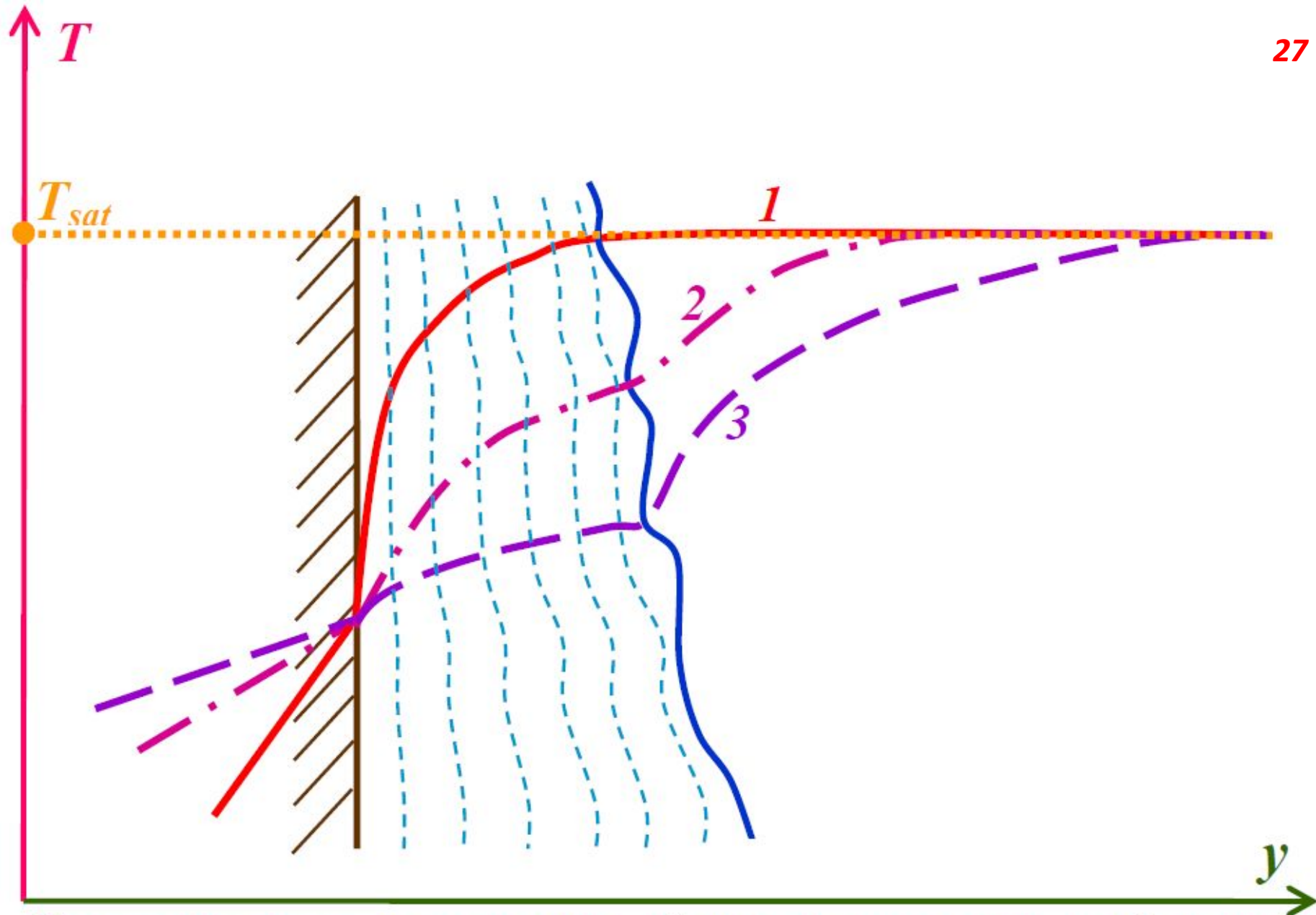
Толщина плёнки растёт.

При этом течение турбулизируется, как следствие эффективная теплопроводность плёнки растёт: за счёт турбулентной составляющей.

В результате коэффициент теплоотдачи α

- увеличивается, если $Pr \geq 1$;
- становится меньше, чем при ламинарном течении:

$\alpha < \alpha_{лам}$, если $Pr \ll 1$ (жидкие металлы).



Изменение поля температур вблизи поверхности конденсации с увеличением количества неконденсируемых газов: $1 < 2 < 3$.

КОНДЕНСАЦИЯ ПАРА ПРИ ПРЯМОМ КОНТАКТЕ ФАЗ

Процессы конденсации пара при прямом контакте фаз, играющие существенную роль в задачах безопасности ядерных реакторов:

- 1) конденсация пузырей пара в жидкости (смешение воды и пара при работе САОР);
- 2) конденсация струи пара в жидкости при смешении воды и пара в корпусе реактора;
- 3) конденсация пара на каплях недогретой до температуры насыщения жидкости (распыление жидкости в камере при работе САОР);
- 4) конденсация на свободных поверхностях.

Основные трудности – определение концентрации (объёмной плотности площади $\equiv$ площади в единице объёма) параметров и взаимодействия фаз на межфазных границах.

Конденсация пара
в потоке **недогретой** жидкости
наблюдается при *поверхностном кипении*

- в каналах ядерного реактора;
- в парогенераторах;
- в смесителях пара и жидкости.

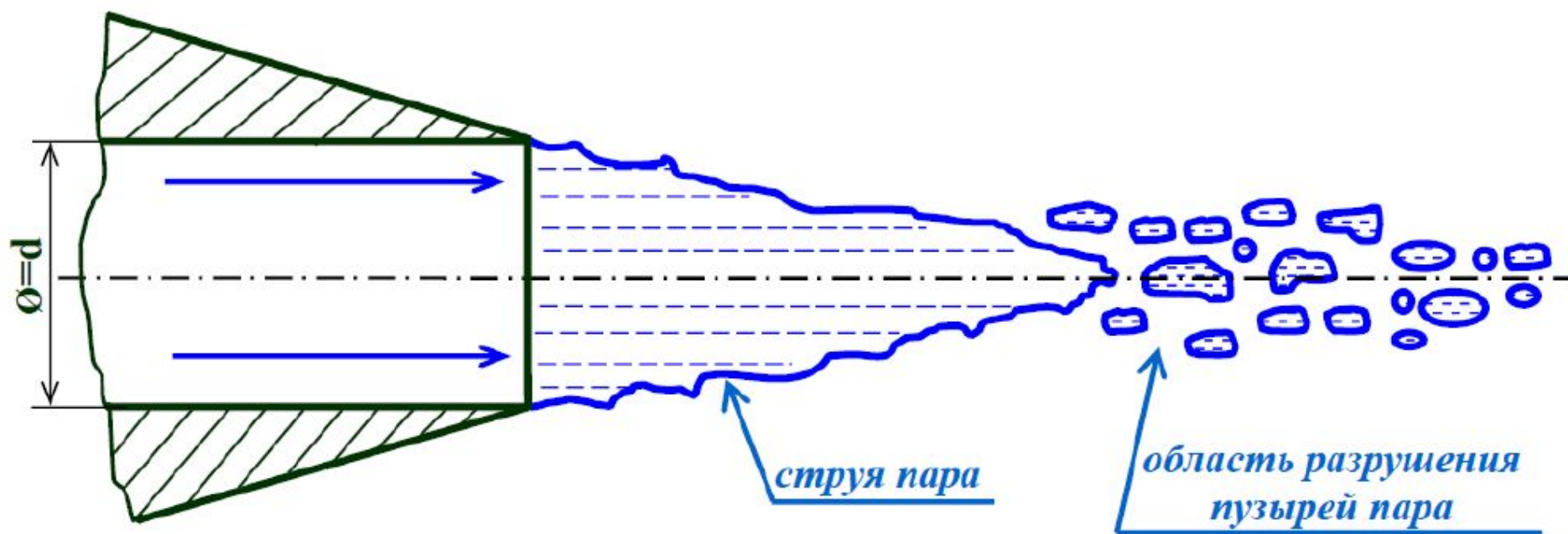
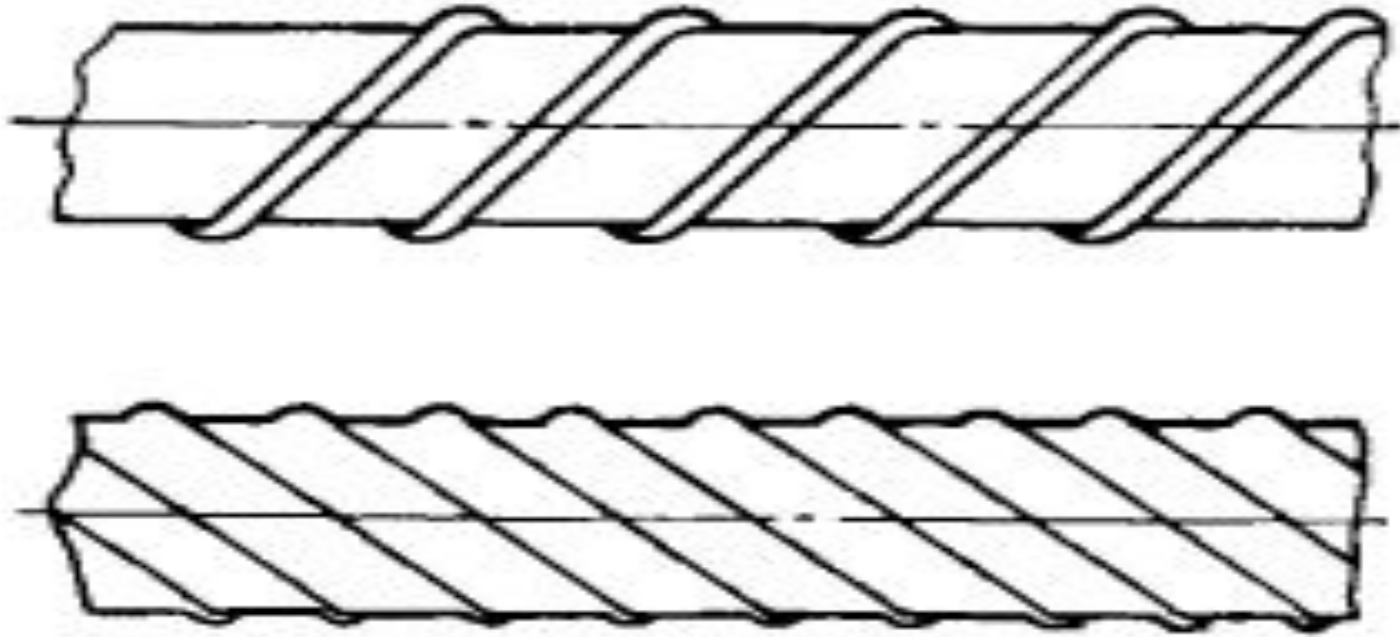


Схема разрушения струи пара при впрыске в недогретую жидкость

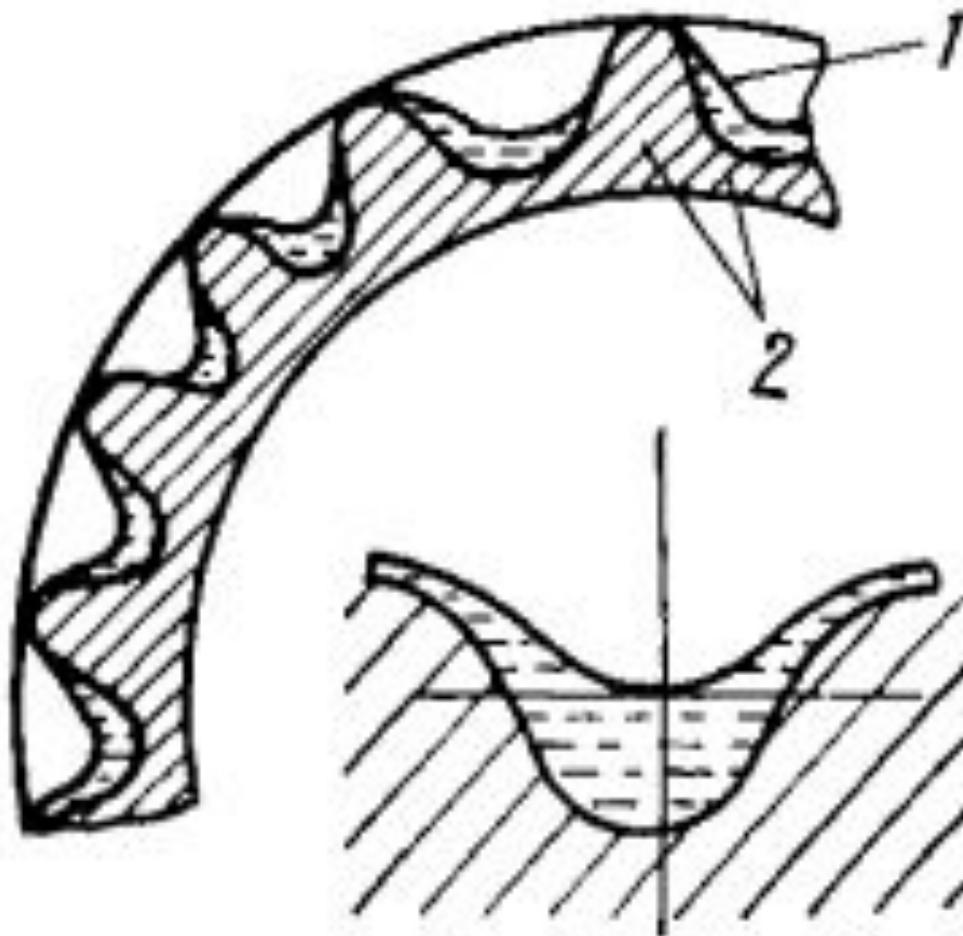
ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ КОНДЕНСАЦИИ

30



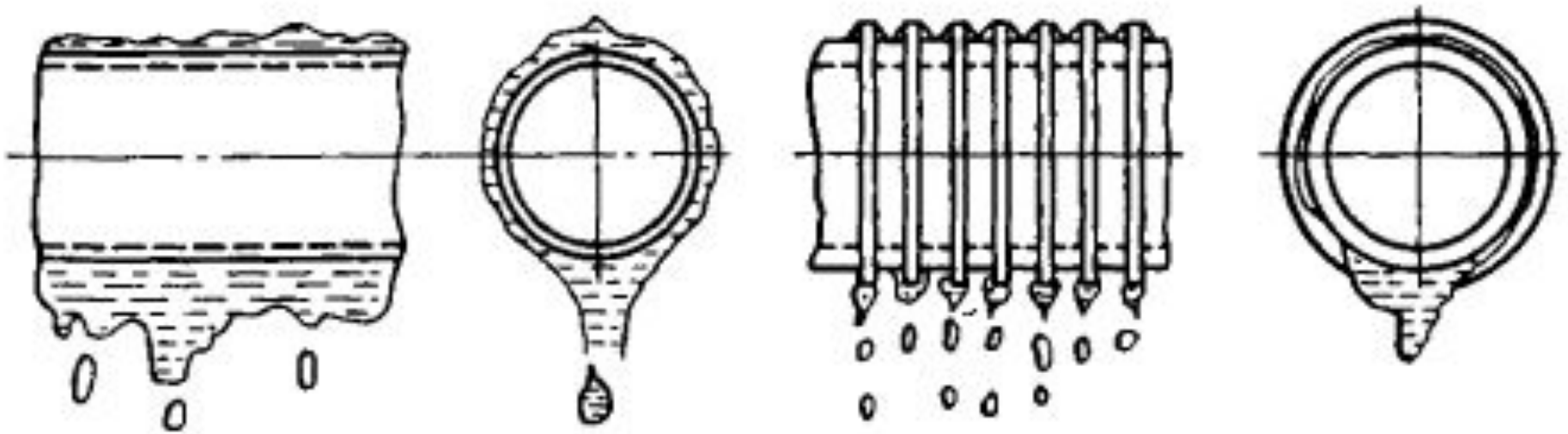
Круглые трубы, поверхности которых
спрофилированы с целью
интенсификации теплообмена
вверху – **ребристая (оребрённая)**
труба;

внизу – **зафторованная** труба



Поперечное сечение ребристой трубы и её фрагмент (внизу).

1 – труба; 2 – плёнка конденсата.



Плёнка конденсата стекает с горизонтальной трубы:
гладкой (левый фрагмент рисунка) и ребристой
(правый)

Профилирование поверхности позволяет уменьшить термическое сопротивление плёнки за счёт уменьшения её толщины.

Для вертикальных поверхностей теплообмен интенсифицируется пока площадь поверхности рёбер не составит 10 % общей поверхности. Дальнейшее увеличение количества рёбер существенного эффекта не даёт. Ребро эффективно до момента полного затопления плёнкой конденсата.

На горизонтальных трубах наличие поперечных рёбер способствует отводу плёнки и увеличению коэффициента теплоотдачи. Под действием сил поверхностного натяжения конденсат движется от гребня к впадине и на большей части поверхности толщина плёнки уменьшается. Основная масса плёнки быстро стекает по желобам, поддерживая толщину плёнки на ребре малой

Основное преимущество использования процесса кипения в ядерной технике состоит в том, что с помощью кипения оказывается возможным отводить от поверхности большие тепловые потоки, не повышая существенно температуру поверхности.

Кипение можно создать

нагревом поверхности  *тепловыделением в объёме.*

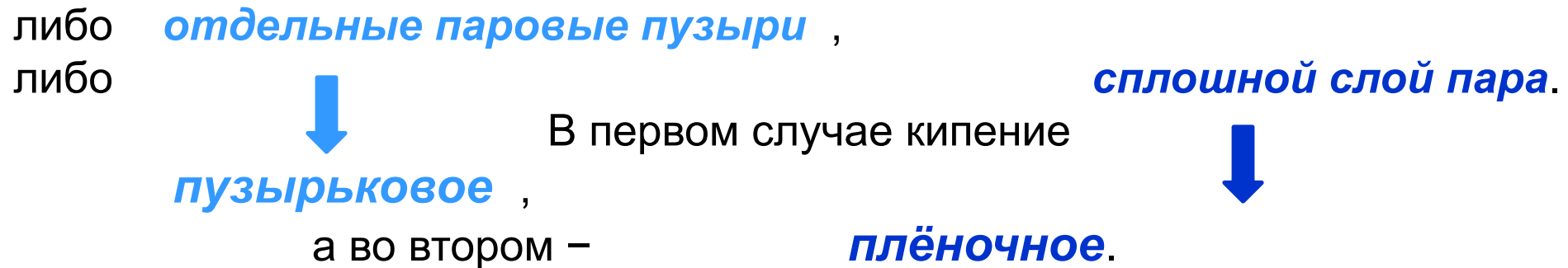
Наибольший интерес (применительно к рассматриваемым в нашем курсе вопросам) представляет кипение на поверхности.

Для возникновения парового пузыря необходим некоторый перегрев жидкости выше температуры насыщения.

Необходимая для начала процесса кипения величина перегрева зависит от чистоты жидкости и наличия центров парообразования.

У поверхности, от которой отводится тепло, перегрев максимален, центрами парообразования служат неровности поверхности (впадины).

В зависимости от плотности теплового потока и других факторов на поверхности образуются



При **пузырьковом** кипении жидкость непосредственно омывает поверхность между центрами парообразования.

При **плёночном** кипении слой пара отделяет большую часть поверхности от массы жидкости. От парового слоя отделяются конгломераты пара, уходящие в толщу жидкости.

Слой малотеплопроводного пара, покрывающий поверхность, уменьшает интенсивность теплообмена во много раз, поэтому переход от пузырькового кипения к плёночному при постоянной плотности теплового потока может сопровождаться резким возрастанием температуры поверхности нагрева (**кризис теплообмена**).

Образование паровой фазы к объёму жидкости происходит из-за флуктуаций плотности, вызываемых хаотическим движением молекул. **36**

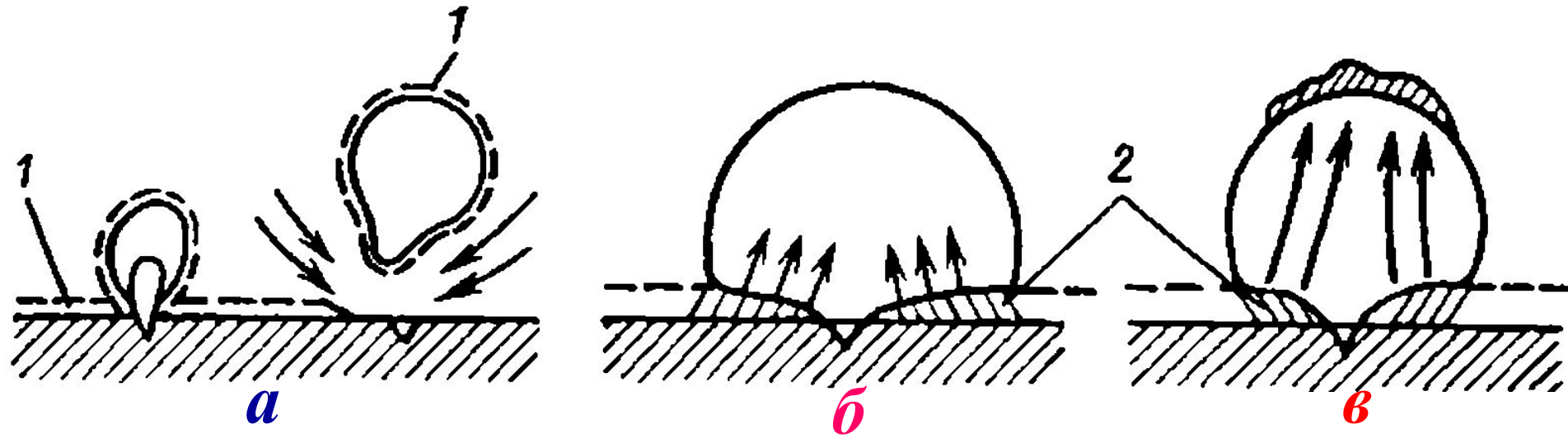
Зарождение парового пузырька на твёрдой поверхности происходит в центрах парообразования, то есть там, где L – энергия (работа) образования поверхности паровой фазы – наименьшая.

Обычно это углубления, впадины поверхности, участки с ослабленным молекулярным сцеплением между жидкостью и твёрдым телом (материалом стенки, поверхность которой рассматривается).

Работа образования парового пузыря объёмом V_{bubble} полной площадью поверхности S_{bubble} , часть которой $S_{sol-surf}$ занята (совпадает с) твёрдой поверхностью, равна

$$L = -\Delta P \cdot V_{bubble} + \sigma_{lv} (S_{bubble} - S_{sol-surf}) + \\ + \sigma_{vs} S_{sol-surf} - \sigma_{ls} S_{sol-surf} \quad .$$

Здесь σ_{lv} , σ_{ls} , σ_{vs} — поверхностные натяжения (работы образования единицы поверхности) между жидкостью и паром; между жидкостью и твердой стенкой; между паром и твердой стенкой.



Причины повышения интенсивности теплообмена при кипении:

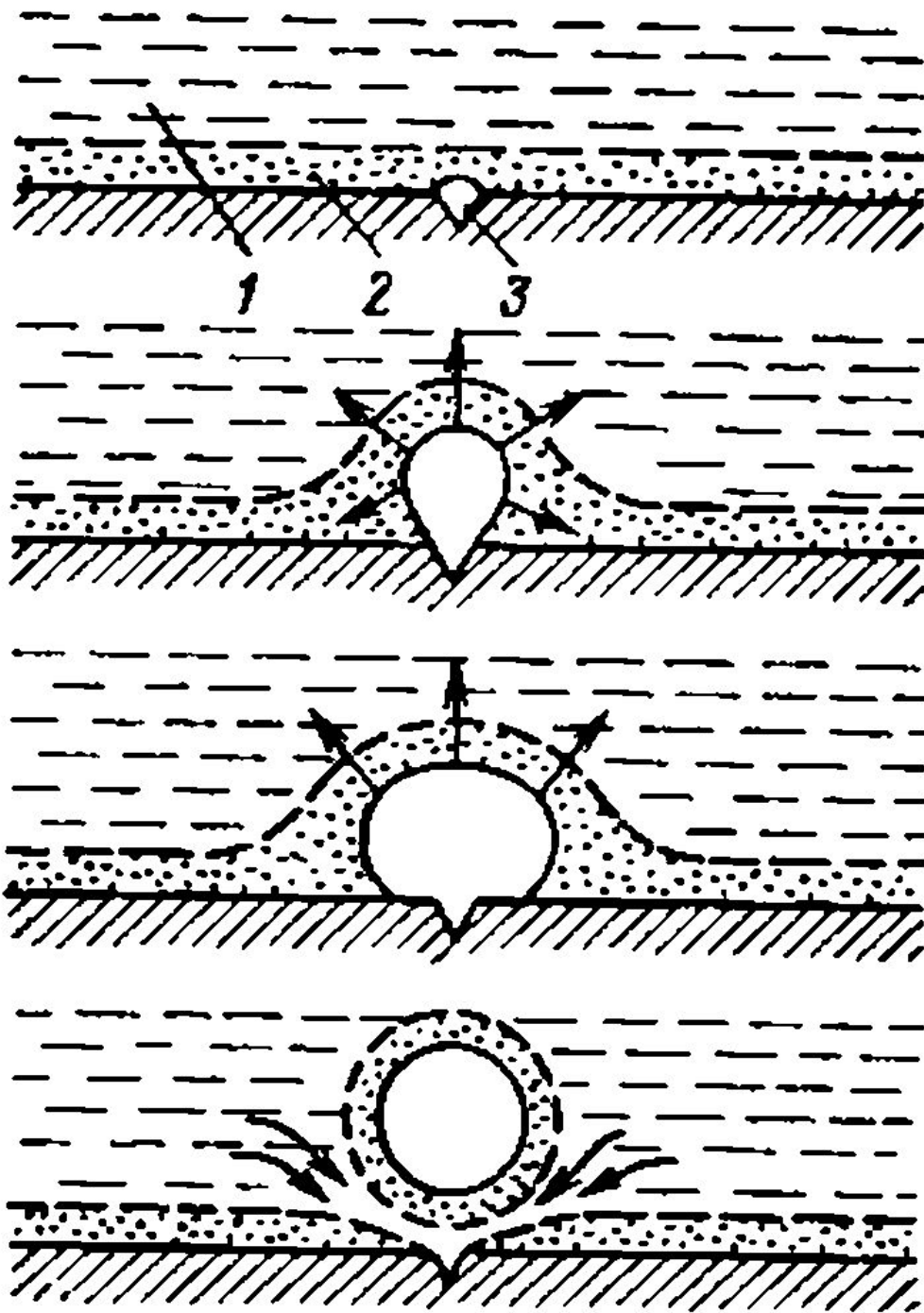
а – турбулизация пограничного слоя, оттеснение пограничного слоя растущим пузырьём

(1 – слой перегретой жидкости);

б – испарение микрослоя под пузырьём

(2 – микрослой у основания пузыря);

в – перенос скрытой теплоты парообразования.



Движение жидкости
во время роста и отрыва
парового пузыря:

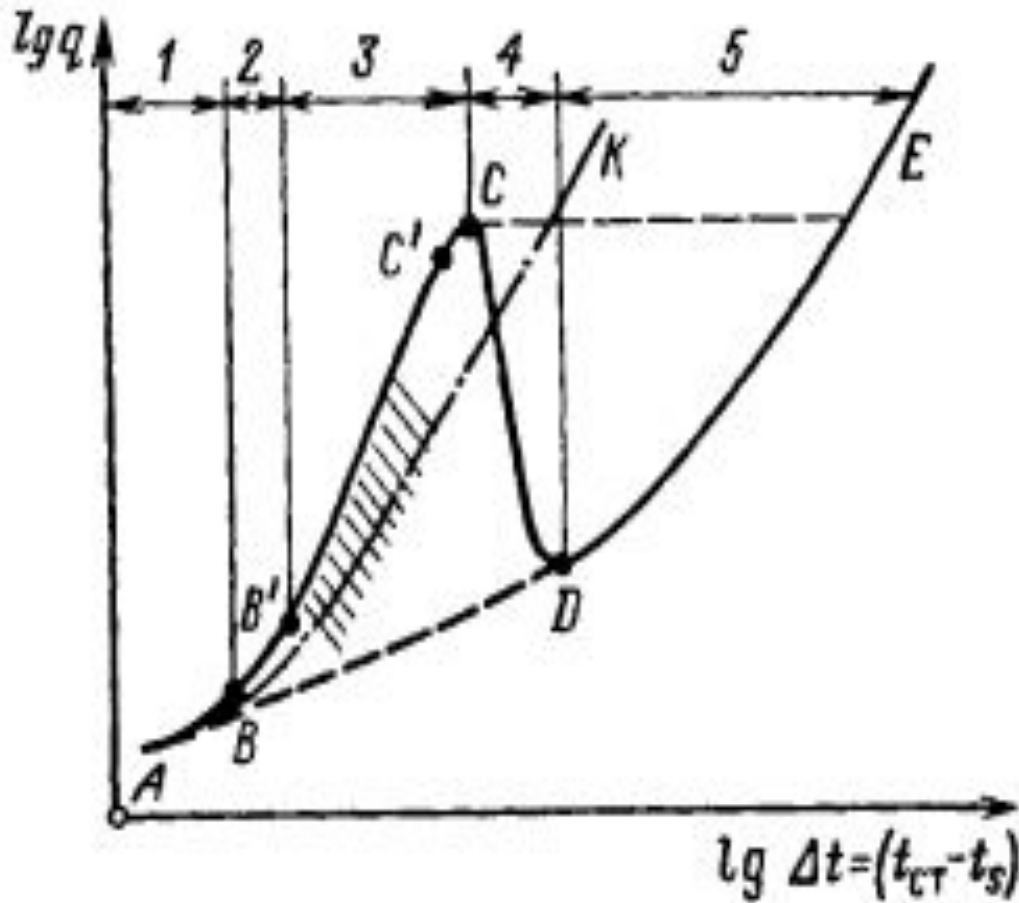
- 1 – жидкость
при температуре
насыщения;
- 2 – перегретая жидкость;
- 3 – центр парообразования.

Различные виды кипения классифицируются:

39

- ◆ по роду кипения:
 - пузырьковое,
 - пленочное;
- ◆ по типу конвекции:
 - кипение при свободной (естественной) конвекции (кипение в большом объёме),
 - кипение при вынужденной (принудительной) конвекции;
- ◆ по отношению средней температуры жидкости ($T_{\text{ж}}$) к температуре насыщения (T_s):
 - кипение жидкости недогретой до температуры насыщения ($T_{\text{ж}} < T_s$) (поверхностное кипение),
 - кипение жидкости догретой до температуры насыщения ($T_{\text{ж}} \approx T_s$);
- ◆ по расположению поверхности:
 - горизонтальная,
 - вертикальная,
 - наклонная;
- ◆ по характеру кипения:
 - развитое,
 - неразвитое,
 - неустойчивое.

КРИВАЯ КИПЕНИЯ В БОЛЬШОМ ОБЪЁМЕ

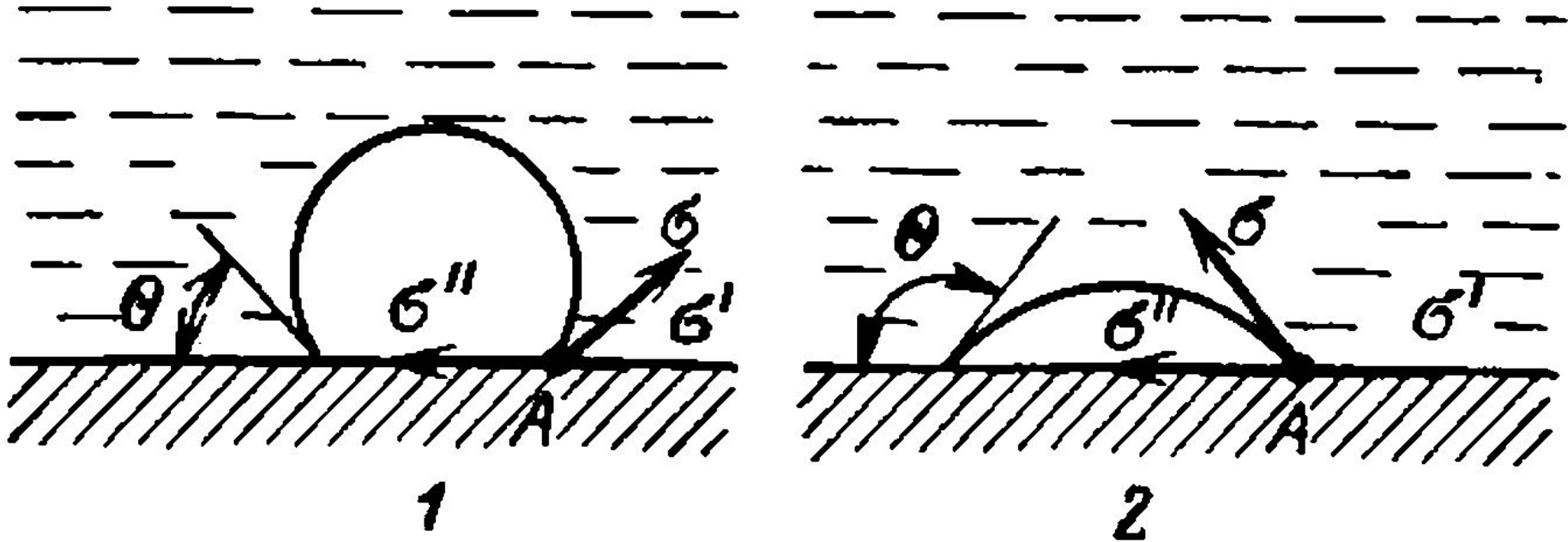


1 – свободная конвекция; 2 – неразвитое кипение; 3 – развитое кипение; 4 – переходное кипение (от пузырькового к плёночному); 5 – плёночное кипение.
 \\\\\ – Область неустойчивого кипения.

Характерные режимы: АВ – свободная конвекция; В – начало пузырькового кипения; В' – начало развитого пузырькового кипения; С' – точка отклонения режима от пузырькового кипения; С – точка кризиса; D – точка Лейденфроста.

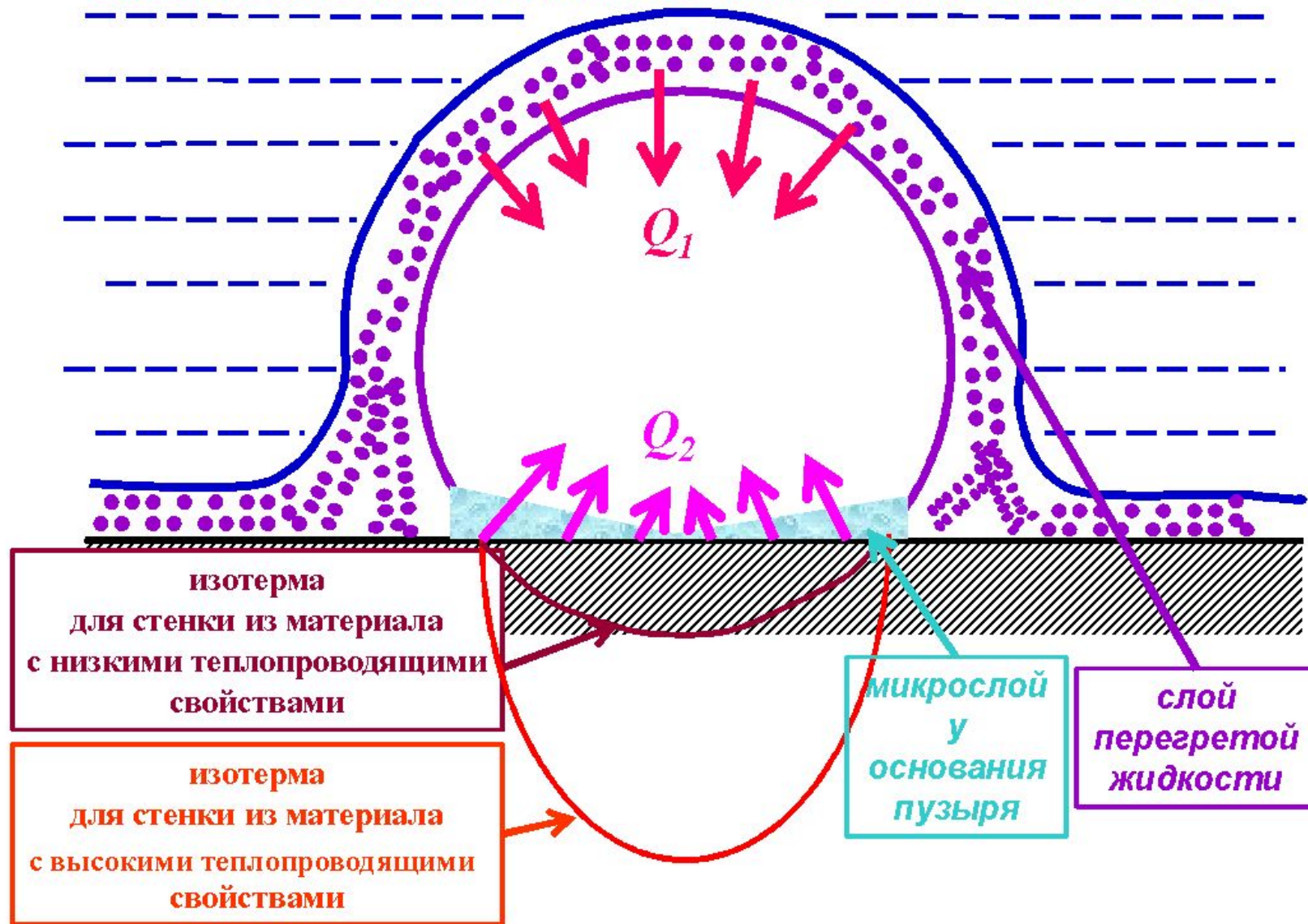
Силы поверхностного натяжения на границе фаз и краевой угол

41

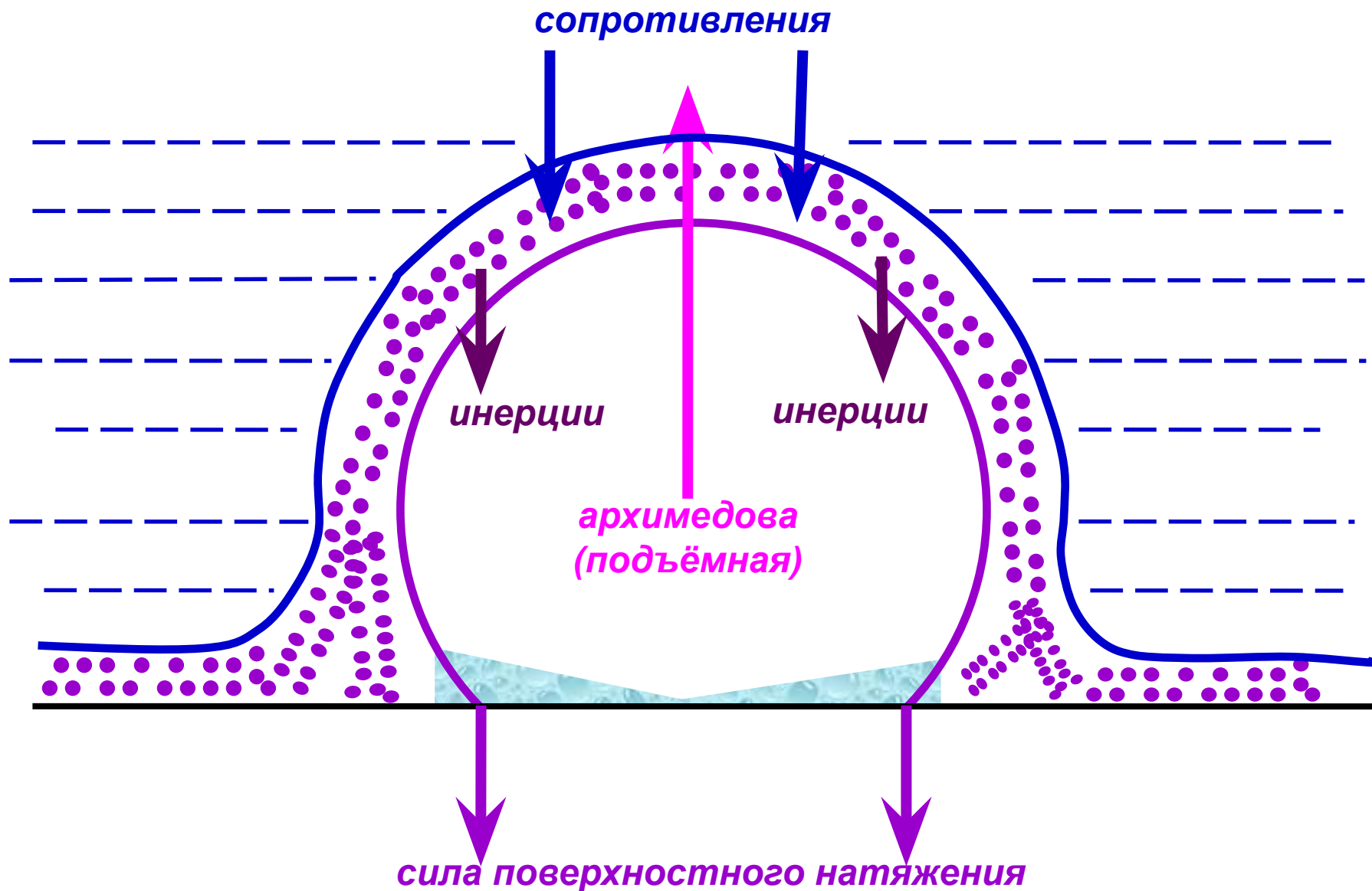


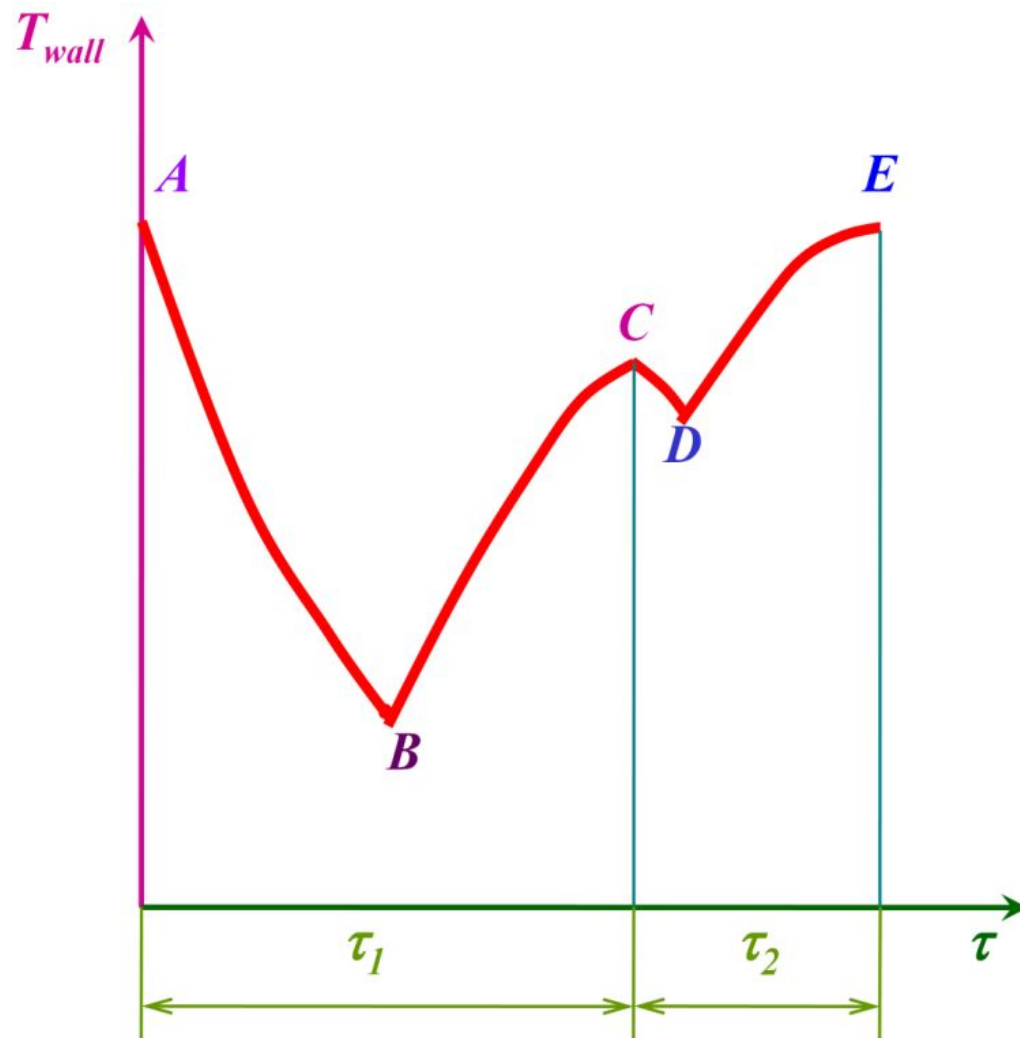
1 – при смачивании поверхности; **2** – при несмачивании поверхности.

**Схема подвода тепла к растущему паровому пузырю
и фронт распространения температурного возмущения в стенке**



Силы, действующие на растущий паровой пузырь





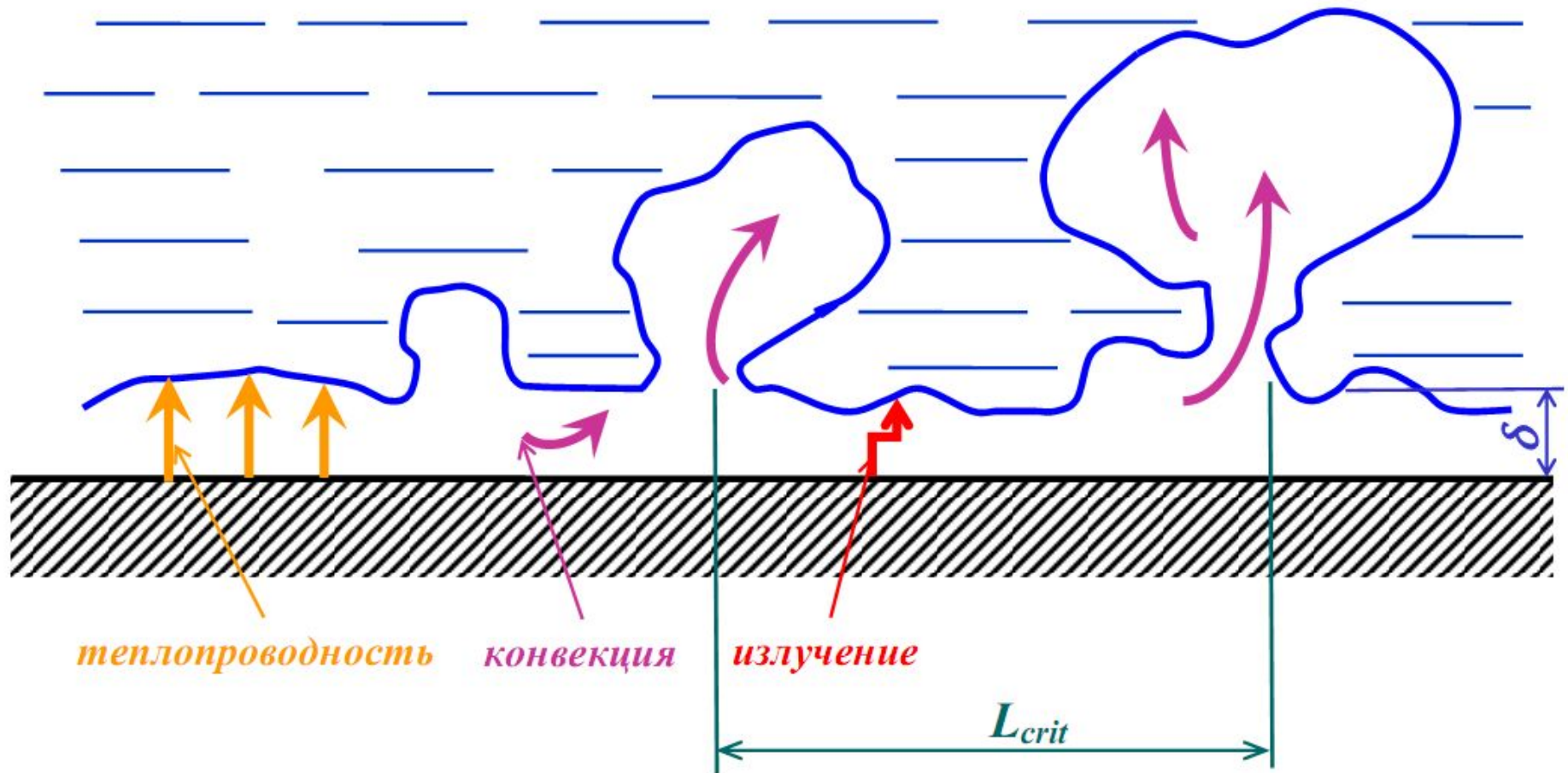
Характер изменения температуры поверхности стенки, расположенной под пузырьем пара:

τ_1 – время роста пузыря до отрыва от поверхности; τ_2 – время от момента отрыва до момента зарождения нового пузыря (время осаждения); A – образование парового зародыша; AB – испарение микрослоя; B – полное испарение микрослоя; BC – рост температуры за счёт ухудшения теплоотдачи к пару; C – отрыв пузыря; CD – понижение температуры за счёт поступления холодной жидкости; DE – образование перегретого слоя жидкости; T_{wall} – температура стенки.

ПЛЁНОЧНОЕ КИПЕНИЕ

45

Схема процесса плёночного кипения на горизонтальной поверхности:



L_{crit} — критическая длина волны (колебания границы раздела фаз)

δ — средняя толщина паровой плёнки

При плёночном кипении жидкость отделена от нагретой поверхности паровой плёнкой, с которой отрываются конгломераты пара нерегулярной формы.

В этом процессе тепло отводится теплопроводностью, конвекцией пара и излучением.

Интенсивность теплообмена определяется механизмами отвода пара, толщиной и режимом движения паровой плёнки (ламинарный, волновой, турбулентный или смешанный). Поэтому определённое значение имеют конфигурация и ориентация поверхности.

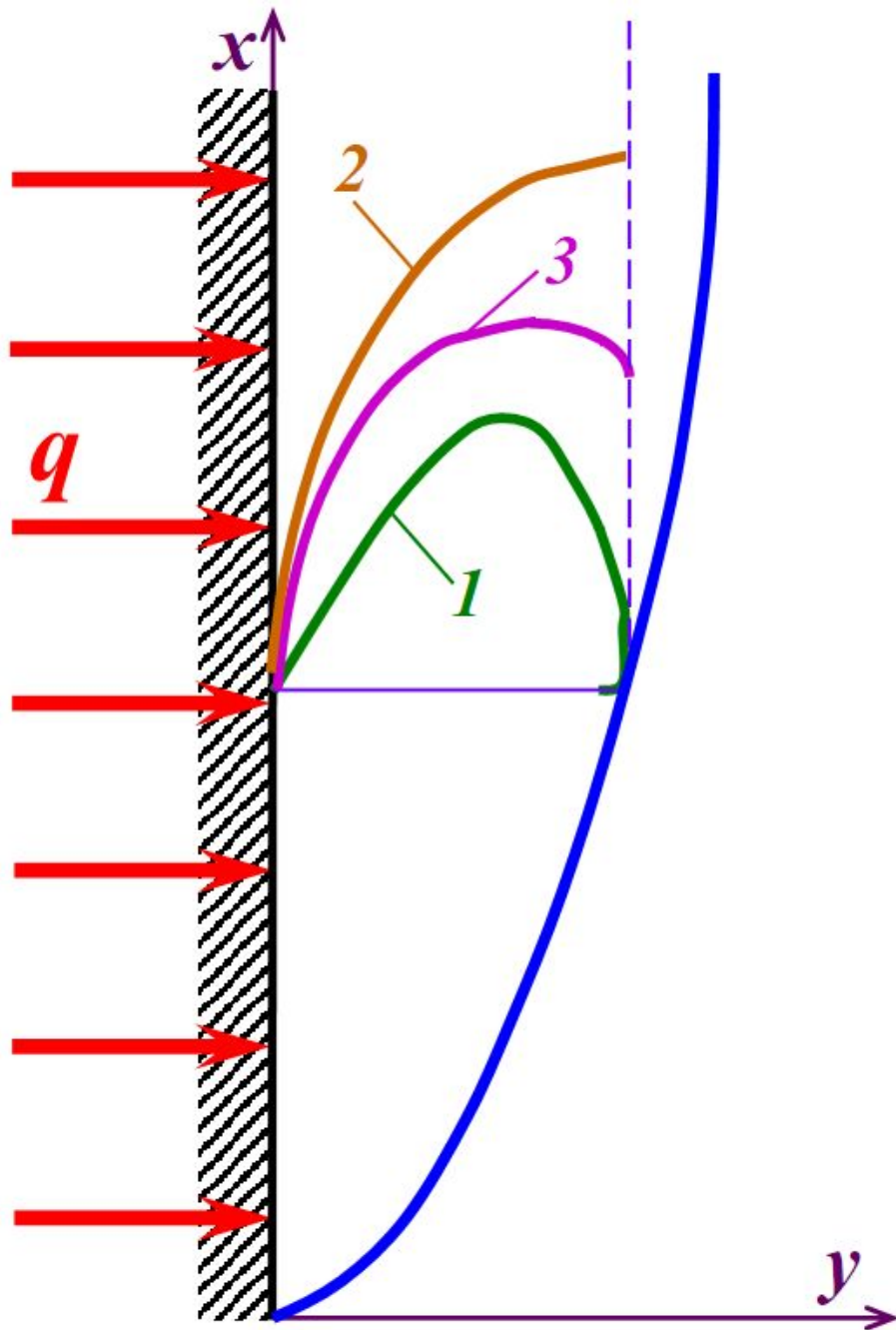
Теоретический анализ плёночного кипения упрощается по сравнению с анализом пузырькового кипения на поверхности, поскольку процесс происходит лишь на границе двух фаз и носит довольно упорядоченный характер.

Однако нестабильность границы паровой пленки, наличие нерегулярных волн, делают анализ пригодным лишь для получения качественных зависимостей, которые помогают понять физическую картину явления, но не могут дать количественных результатов.

Для горизонтальной поверхности масштабом расстояния между отрывающимися пузырями пара служит критическая длина волны колебаний границы раздела фаз.

Она имеет порядок капиллярной постоянной:

$$l = \sqrt{\frac{\sigma}{g (\rho_{\text{liquid}} - \rho_{\text{vapor}})}} .$$

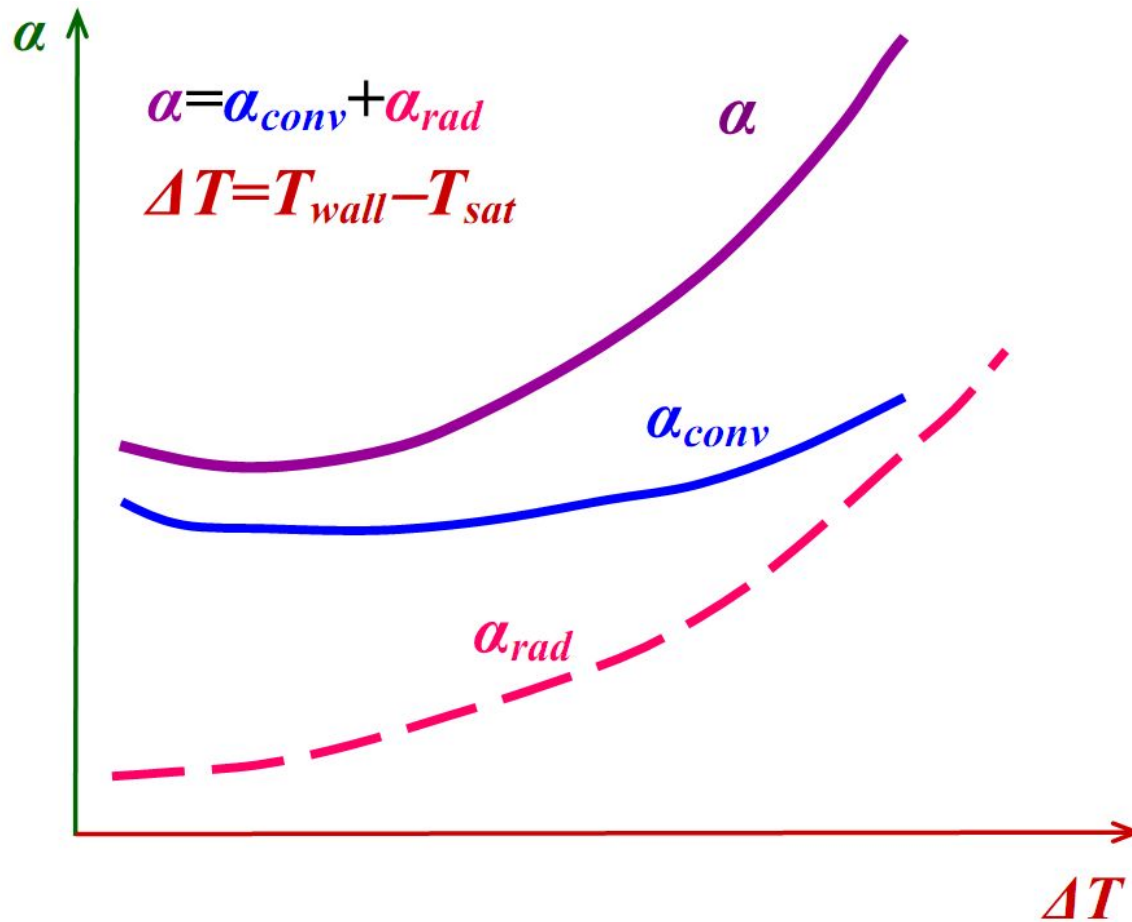


Распределение скоростей в движущейся верх плёнке пара у тепловыделяющей плоской вертикальной поверхности, на которой поддерживается постоянный поверхностный тепловой поток:

1 – $w_{boundary}=0$;

2 – $dw/dy=0$;

3 – w – реальный профиль.



Зависимость коэффициента теплоотдачи при плёночном кипении от разности температур стенки и температуры насыщения. Коэффициент теплоотдачи является суммой двух составляющих: конвективной и радиационной.

1. Конденсация. Классификация.
2. Кипение. Классификация.
3. Кипение. Кривая кипения. Режимы кипения.

*ДЗЯКУЙ
ЗА ЎВАГУ*

*СПАСИБО
ЗА ВНИМАНИЕ*

*THANK FOR
YOUR ATTENTION*