ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОС

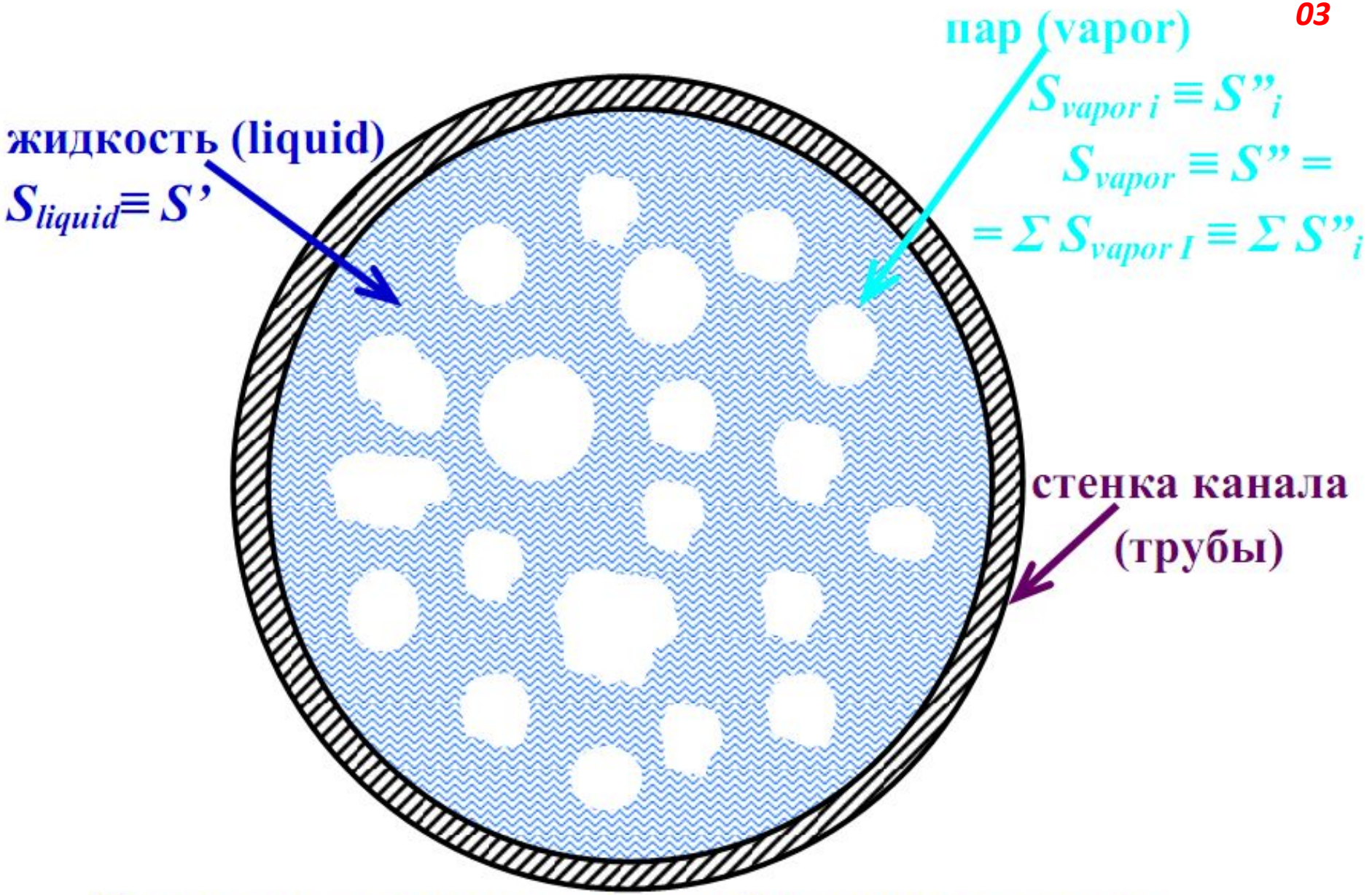
В

ЯДЕРНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ

ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОС В ЯДЕРНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ

Тема № 9

Гидродинамика и теплообмен двухфазных потоков



Поперечное сечение парожидкостного потока

Двухфазный поток (парожидкостная смесь) называется ***гомогенным***, *если фазы распределены равномерно по объёму*. В противном случае поток будет ***гетерогенным***.

Двухфазный поток называется ***адиабатным***, если *отсутствует теплообмен между потоком и поверхностью канала*. *При наличии теплообмена с поверхностью канала* поток называют **диабатным**.

Если *фазы имеют одинаковую температуру*, поток будет ***термодинамически равновесным***. Режим кипения жидкости, недогретой до температуры насыщения, и режим осушения потока пара с каплями жидкости (влажного пара), т. е. режимы, в которых фазы имеют разную температуру, являют*ся* примерами ***термодинамически неравновесных*** потоков.

Классификация парожидкостных потоков: по структуре (С) – гомогенные (*ГМ*), гетерогенные (*ГТ*); по наличию теплообмена с поверхностью канала (О) – *адиабатные (А)*, диабатные (*Д*); по термодинамическим параметрам (Т) – равновесные (*Р*), неравновесные (*Н*).

Для количественного описания двухфазного потока необходимо ввести ряд новых понятий: расходы жидкой и паровой фаз, их средние скорости, плотность смеси и др.

06

Если предположить, что *фазы находятся в термодинамическом равновесии, а их средние скорости одинаковы*, то, *зная расход каждой фазы на входе в канал, геометрию канала и плотность теплового потока на стенке*, из уравнений материального и теплового баланса можно найти изменение расхода и средней скорости каждой фазы, а также плотность смеси по длине канала.

Найденные при таких допущениях параметры потока называются ***расходными.***

Поскольку жидкость в потоке может быть перегрета или недогрета по отношению к температуре насыщения, а средние скорости фаз могут не совпадать, то в этих случаях расходные параметры не отражают состояния потока.

Поэтому наряду с расходными вводятся ***истинные*** параметры, описывающие действительное состояние потока.

Далее рассмотрены основные расходные и истинные параметры, применяющиеся для описания *двухфазных стационарных потоков.*

***Массовый расход – G**, кг/с:*

$$G \equiv \rho u S \quad ,$$

где ρ – плотность теплоносителя, *кг/м*^{3}; ***u*** – аксиальная (перпендикулярная плоскости поперечного (проходного) сечения) скорость теплоносителя, *м/с*; ***S*** – площадь проходного сечения, *м*^{2}.

Массовый расход, *кг/с*, пароводяной смеси в двухфазном потоке складывается из массовых расходов жидкой (*обозначена одним штрихом*) и паровой (*два штриха*) фаз*:*

$$G = G' + G'' \quad .$$

Если фазы находятся в термодинамическом равновесии, то масовый расход пара можно определить из соотношения

$$G'' = \frac{h - h'}{r} G = \frac{h - h'}{h'' - h'} G \quad .$$

Здесь ***h*** и ***h'*** – удельная энтальпия, *Дж/кг*, пароводяной смеси и удельная энтальпия, *Дж/кг*, жидкости на линии насыщения, соответственно, ; ***r*** – теплота парообразования, *Дж/кг*; ***h"*** – удельная энтальпия пара, *Дж/кг*.

Массовое расходное паросодержание, x, *– отношение массового расхода паровой фазы к массовому расходу пароводяной смеси:*

08

$$x \equiv \frac{G''}{G} \quad . \tag{1}$$

Массовое расходное паросодержание характеризует долю пара в массовом расходе.

Массовое расходное содержание жидкой фазы есть

$$1 - x = \frac{G'}{G} \quad . \tag{2}$$

Если рассматриваемый в двухфазном приближении парожидкостный поток полагается равновесным, то справедливо соотношение

$$x = \frac{h - h'}{r} = \frac{h - h'}{h'' - h'} \quad . \tag{3}$$

Для потока жидкости при температуре насыщения массовое расходное паросодержание равно нулю: $x=0$, а массовое расходное паросодержание в потоке насыщенного пара равно, естественно единице: $x=1$.

Относительная балансная энтальпия:

$$x_б \equiv \frac{h - h'}{r} = \frac{h - h'}{h'' - h'} \quad . \qquad (7)$$

Для *термодинамически равновесных потоков* $x_б = x$.

Если равновесие в потоке между фазами отсутствует, то массовое расходное паросодержание, рассчитанное по энтальпии смеси (формула (3)), ***не*** *отражает её действительного состава.*

Например, для однофазного потока перегретой жидкости x будет больше нуля, а для двухфазного потока, состоящего из холодной жидкости и не успевших сконденсироваться в ней пузырьков пара, – меньше нуля.

Объёмное расходное паросодержание, β, *– отношение объёмного расхода пара к объёмному расходу пароводяной смеси*

$$\beta \equiv \frac{V''}{V} = \frac{V''}{V' + V''} \quad . \tag{4}$$

где ***V, V'' и V'' – объёмные расходы*** *пароводяной смеси, жидкой и паровой фаз, соответственно.* ***V=G/ρ***, $м^3/с$; ***V'=G'/ρ'***, $м^3/с$; ***V''=G''/ρ''***, $м^3/с$.

Истинное объёмное паросодержание, φ, *– отношение площади поперечного сечения канала, занимаемой паровой фазой, к полной площади поперечного сечения.*

$$\varphi \equiv \frac{S''}{S} = \frac{S''}{S' + S''} \quad . \tag{5}$$

Обычно в *двухфазном адиабатном* потоке пар движется быстрее жидкости, поэтому истинное объёмное паросодержание оказывается ниже объёмного расходного паросодержания:

$$\varphi \equiv \frac{S''}{S} < \frac{V''}{V} \equiv \beta \quad . \tag{6}$$

ФАЗА ≠ АГРЕГАТНОЕ СОСТОЯНИЕ

Находясь в одном агрегатном состоянии, вещество может принадлежать к разным фазам (для описания термодинамические параметры различны; для описания процессов межфазного взаимодействия используют различные уравнения).

Таким образом, пароводяную смесь можно рассматривать как многофазную (а не только двухфазную) среду.

Например, сплошная жидкость (частный случай –жидкая плёнка) и капли жидкости, сплошной пар и паровые пузыри.

Если различия только в части описания гидродинамического поведения, говорят о различных полях одной и той же фазы.

Например, температура и давление в каплях жидкости и сплошной жидкости одинаковы, а скорости различны. В таком случае для описания их поведения используются (в рамках модели раздельного течения фаз) различные уравнения сохранения массы и импульса фазы, но общее уравнение сохранения энергии.

В таком случае говорят об ***истинном объёмном фазосодержании*** (или ***содержании фазы***), α, – *отношение площади поперечного сечения канала, занимаемой фазой, к полной площади поперечного сечения:* $\alpha_i \equiv S_i / S$.

Английский вариант – ***void fraction***.

$$0 \le \alpha_i \le 1 \quad ;$$

$$\sum_i \alpha_i = 1 \quad .$$

$$\varphi_{liquid} + \varphi_{vapor} = 1 \quad ,$$

$$\varphi \equiv \varphi_{vapor} \quad \Rightarrow \quad \varphi_{liquid} \equiv 1 - \varphi \quad .$$

Таким образом, если пароводяная смесь рассматривается в двухфазном приближении, достаточно ввести в рассмотрение истинное объёмное содержание паровой фазы (истинное объёмное паросодержание) – φ, истинное объёмное содержание жидкой фазы определяется как $1-\varphi$.

Если количество фаз равно N, то достаточно знать N–1 истинных объёмных паросодержаний. Оставшееся, очевидно, находится из соотношения

$$\alpha_N = 1 - \sum_{i=1}^{N-1} \alpha_i \quad .$$

Зная объёмное паросодержание (расходное или истинное) можно определить ***расходную плотность потока пароводяной смеси***:

$$\overline{\rho_\beta} \equiv \rho'' \beta + \rho' (1 - \beta)$$

и ***истинную плотность потока пароводяной смеси***:

$$\overline{\rho_\varphi} \equiv \rho'' \varphi + \rho' (1 - \varphi) \quad .$$

Удобной характеристикой является ***средняя массовая скорость потока пароводяной смеси***:

$$\overline{\rho w} \equiv \frac{G}{S} \quad , \qquad \textit{кг/(м}^2\textit{·с).}$$

Средняя массовая скорость не зависит от плотности смеси и потому при стационарном течении в каналах постоянного сечения как при наличии, так и при отсутствии фазовых превращений в потоке остается неизменной по длине.

Кроме средней массовой скорости для описания двухфазного потока используются следующие характерные скорости:

скорость циркуляции *– скорость, которую имел бы поток, если бы его плотность была равна плотности жидкости при температуре насыщения:*

$$w_0 \equiv \frac{G}{\rho' S} \quad .$$

приведенные скорости жидкой и паровой фаз *– скорости, которые имели бы соответственно жидкость или пар, если бы только жидкость или только пар занимали все сечение канала*:

$$w'_0 \equiv \frac{V'}{S} = \frac{G'}{\rho' S} \quad ; \quad w''_0 \equiv \frac{V''}{S} = \frac{G''}{\rho'' S} \quad .$$

истинные скорости жидкой и газообразной фаз:

$$w'_{И} \equiv \frac{V'}{S'} = \frac{w'_0}{1-\varphi} \quad ; \quad w''_{И} \equiv \frac{V''}{S''} = \frac{w''_0}{\varphi} \quad ; \qquad (7)$$

истинная средняя скорость потока пароводяной смеси:

$$\overline{w_{И}} \equiv \frac{G}{\overline{\rho_{\varphi}} S} = \frac{w'_0}{\varphi\rho'' + (1-\varphi)\rho'} \quad ;$$

расходная средняя скорость потока пароводяной смеси:

$$\overline{w_{Р}} \equiv \frac{G}{\overline{\rho_{\beta}} S} = w_0 \left[x + \frac{\rho''}{\rho'}(1-x) \right] \quad ;$$

ОБЫЧНО истинные скорости фаз НЕ равны между собой.
Их разность называется ***относительной скоростью фаз***:

$$w_{отн} \equiv w''_{И} - w'_{И} \quad .$$

Располагая данными об истинных скоростях фаз, с помощью соотношений (7) нетрудно определить истинное объёмное паросодержание потока.

Связь между истинным объёмным паросодержанием и расходным массовым паросодержанием можно выразить через отношение истинных скоростей фаз:

$$\varphi = \frac{1}{1 + \frac{\rho''}{\rho'} \cdot \frac{w''_{И}}{w'_{И}} \frac{1-x}{x}} \quad .$$

Связь объёмного и массового расходных паросодержаний можно получить, если воспользоваться соотношениями (1), (2) и (4):

$$\beta = \frac{1}{1 + \frac{\rho''}{\rho'} \cdot \frac{1-x}{x}} \quad .$$

Важной характеристикой двухфазного потока с подводом тепла является также плотность теплового потока на стенке q_c.

В отличие от величины x, изменяющейся в диапазоне $0 \div 1$, *относительная энтальпия* $x_б$ *может иметь как отрицательные значения, так и значения больше единицы*.

Следует обратить внимание на то, что в условиях работы каналов активной зоны реактора и парогенераторов при значениях относительной энтальпии, близких к нулю или единице, двухфазный поток при подводе тепла может быть термодинамически неравновесным.

Пар может присутствовать в жидкости, которая в среднем недогрета до температуры насыщения.

В потоке пара с каплями жидкости пар может быть перегрет, несмотря на присутствие жидкости.

Эти обстоятельства усложняют расчёты таких режимов.

Режимы течения двухфазных потоков отличаются большим разнообразием.

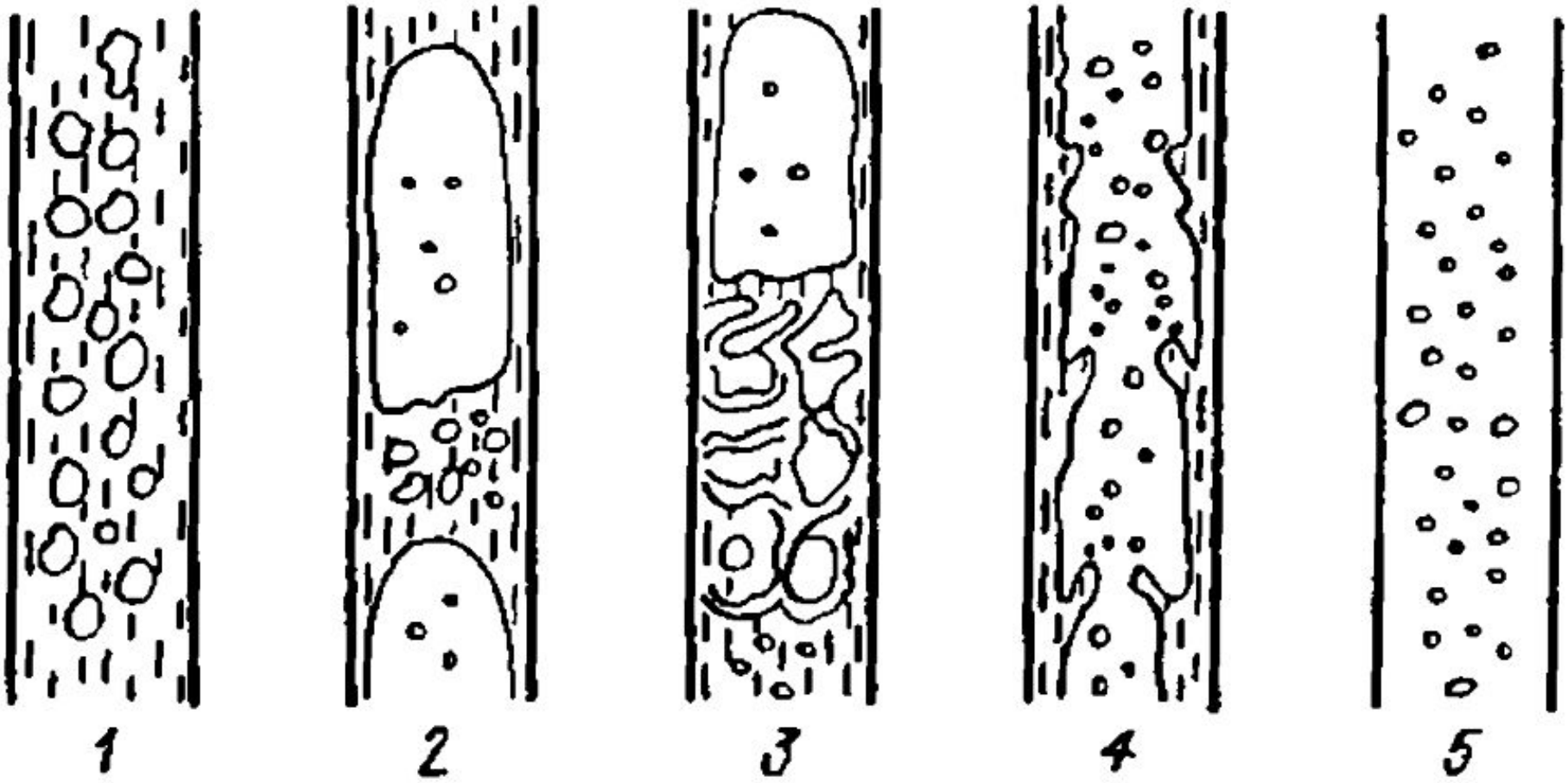
Тот или иной режим течения характеризуется определенным распределением фаз и скоростей в двухфазном потоке.

Изучение взаимосвязи этих характеристик (даже усреднённых во времени) с законами сопротивления трения и теплоотдачи связано с большими экспериментальными трудностями.

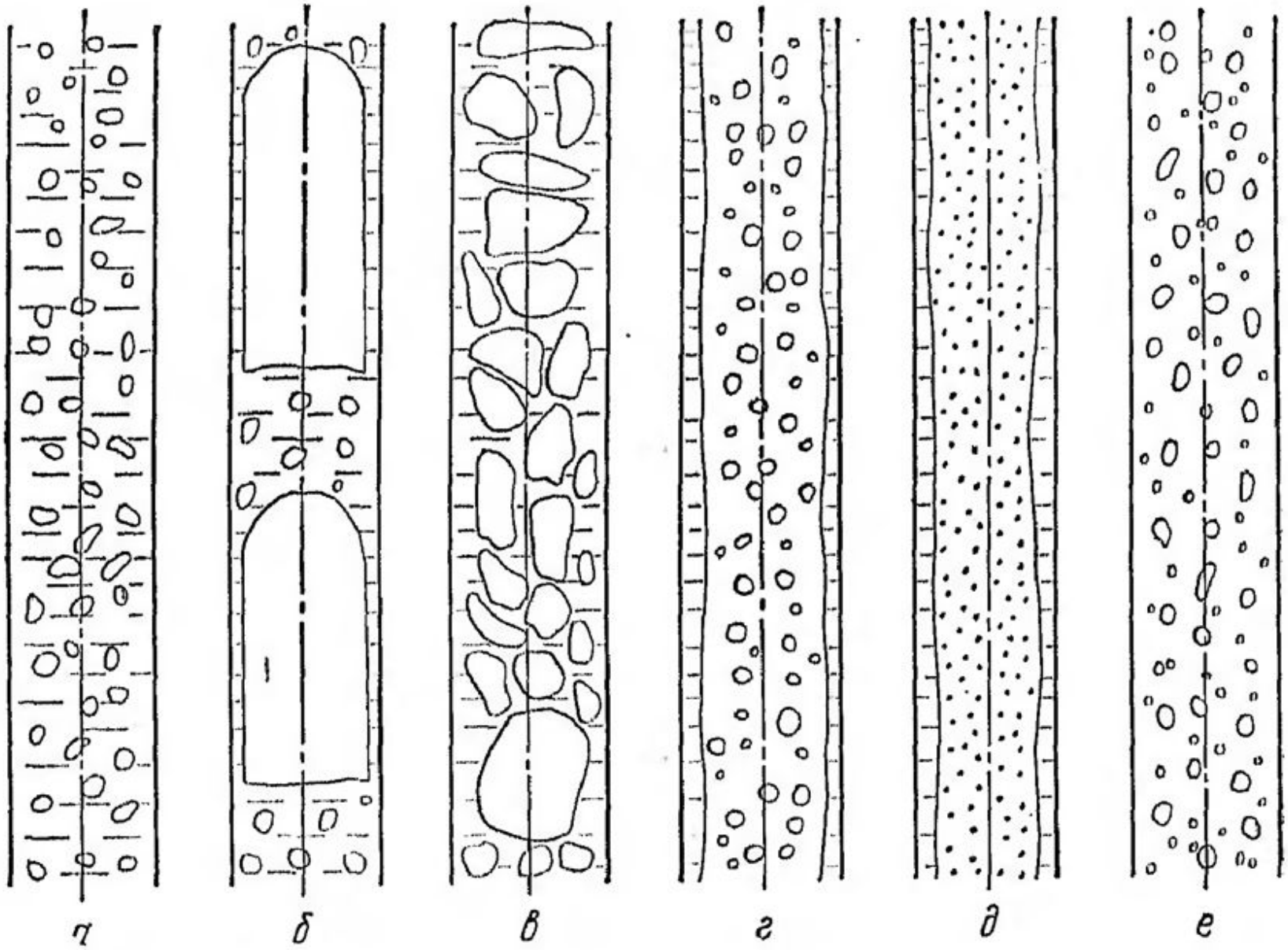
Пока еще не установлены достаточно строгие количественные связи режимов течения с местными параметрами потока. Поэтому классификация режимов течения построена в основном на результатах визуального изучения картин течения.

На основе наблюдений газо-жидкостных и парожидкостных потоков, движущихся в вертикальных трубах снизу вверх, можно выделить **пять** (иногда выделяют *шесть*) основных режимов течения.

РЕЖИМЫ ТЕЧЕНИЯ В ТРУБАХ



1 – пузырьковый; 2 – снарядный; 3 – эмульсионный, полукольцевой; 4 – дисперсно-кольцевой; 5 – дисперсный



Режимы течения двухфазного потока в вертикальной трубе:
а – пузырьковый; б – снарядный; в – эмульсионный;
г – дисперсно-кольцевой; д – кольцевой; с – дисперсный.

Пузырьковый — такой режим течения, при котором паровая фаза распределена в жидкости в виде небольших пузырьков, размеры которых малы по сравнению с характерным размером поперечного сечения канала. С увеличением расхода пара количество и размеры пузырьков возрастают.

Снарядный — это режим течения, при котором паровая фаза движется в виде крупных пузырей, поперечные размеры которых соизмеримы с характерным размером поперечного сечения канала, а длина может достигать нескольких характерных размеров. От стенки пузыри отделены тонким слоем жидкости, а друг от друга — жидкостными пробками.

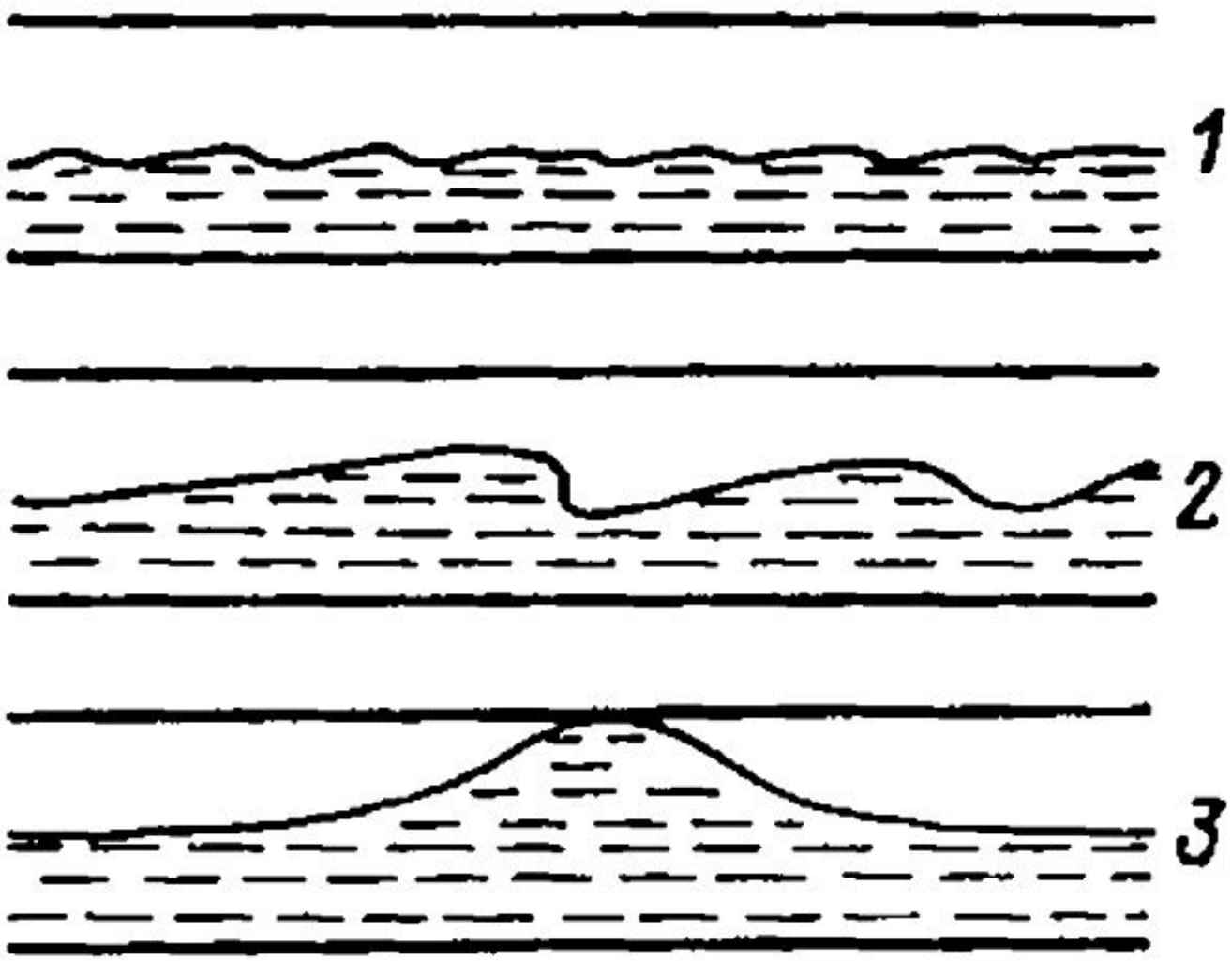
Эмульсионный — это режим течения, при котором паровая фаза распределена в потоке в виде небольших объемов, разделенных жидкими пленками.

Дисперсно-кольцевой — такой режим течения, при котором паровая фаза образует ядро потока, а жидкая фаза движется в виде плёнки по поверхности трубы и в виде мелких капель, распределенных в газообразном ядре.

Некоторые авторы различают два предельных случая дисперсно-кольцевого режима:

Стержневой (кольцевой) режим течения, когда вся жидкость движется в виде плёнки.

Дисперсный режим течения, когда вся жидкость движется в виде мелких капель, распределенных в потоке пара.



Дополнительные режимы в горизонтальных трубах:
1 – расслоенный; 2 – волновой; 3 – поршневой

Установление чётких границ существования режимов течения встречает определенные затруднения.

Во-первых, *смена одного режима течения другим происходит постепенно, без резких границ*.

Во-вторых, *устойчивость режима течения зависит от многих трудно поддающихся учёту факторов и граница существования того или иного режима может смещаться*.

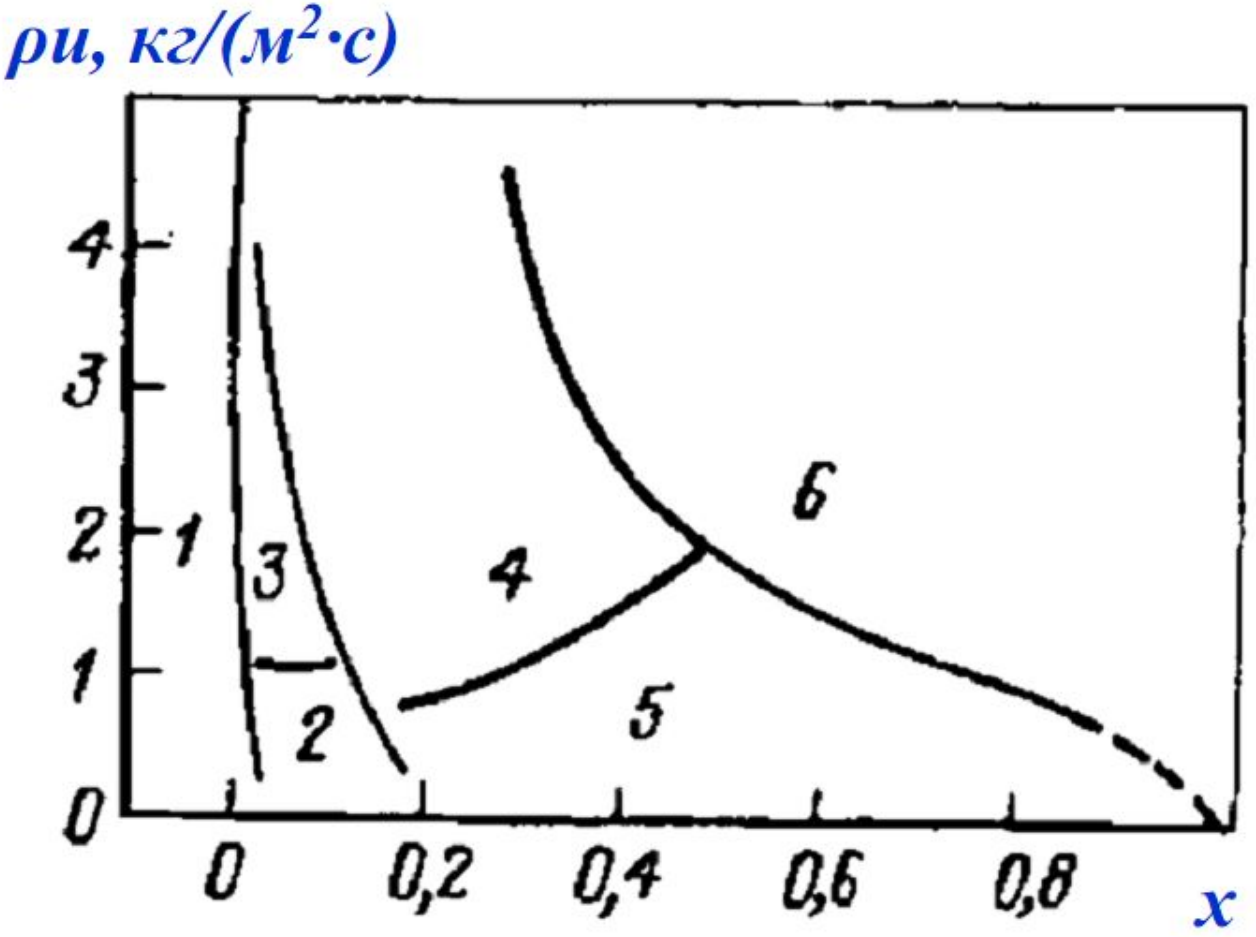
В третьих, *разработанные методы фиксации режимов течения еще недостаточно надёжны*.

Поэтому *условия, в которых реализуются те или иные режимы и, следовательно, границы их существования, можно указать лишь весьма приближённо и в значительной мере качественно*.

Области реализации *режимов течения* принято изображать с помощью *диаграмм*.

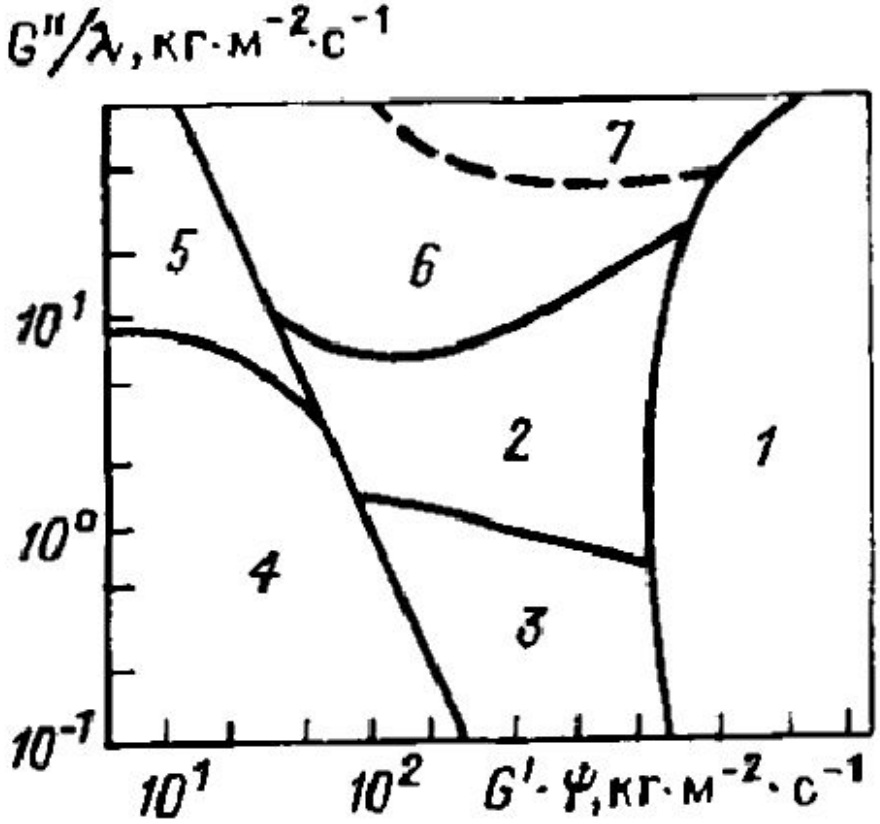
В настоящее время предложено несколько типов диаграмм, но все они не свободны от серьезных недостатков.

Диаграмма режимов течения пароводяной смеси в вертикальной трубе (внутренний диаметр = 12,7 мм) при давлении 7,0 МПа

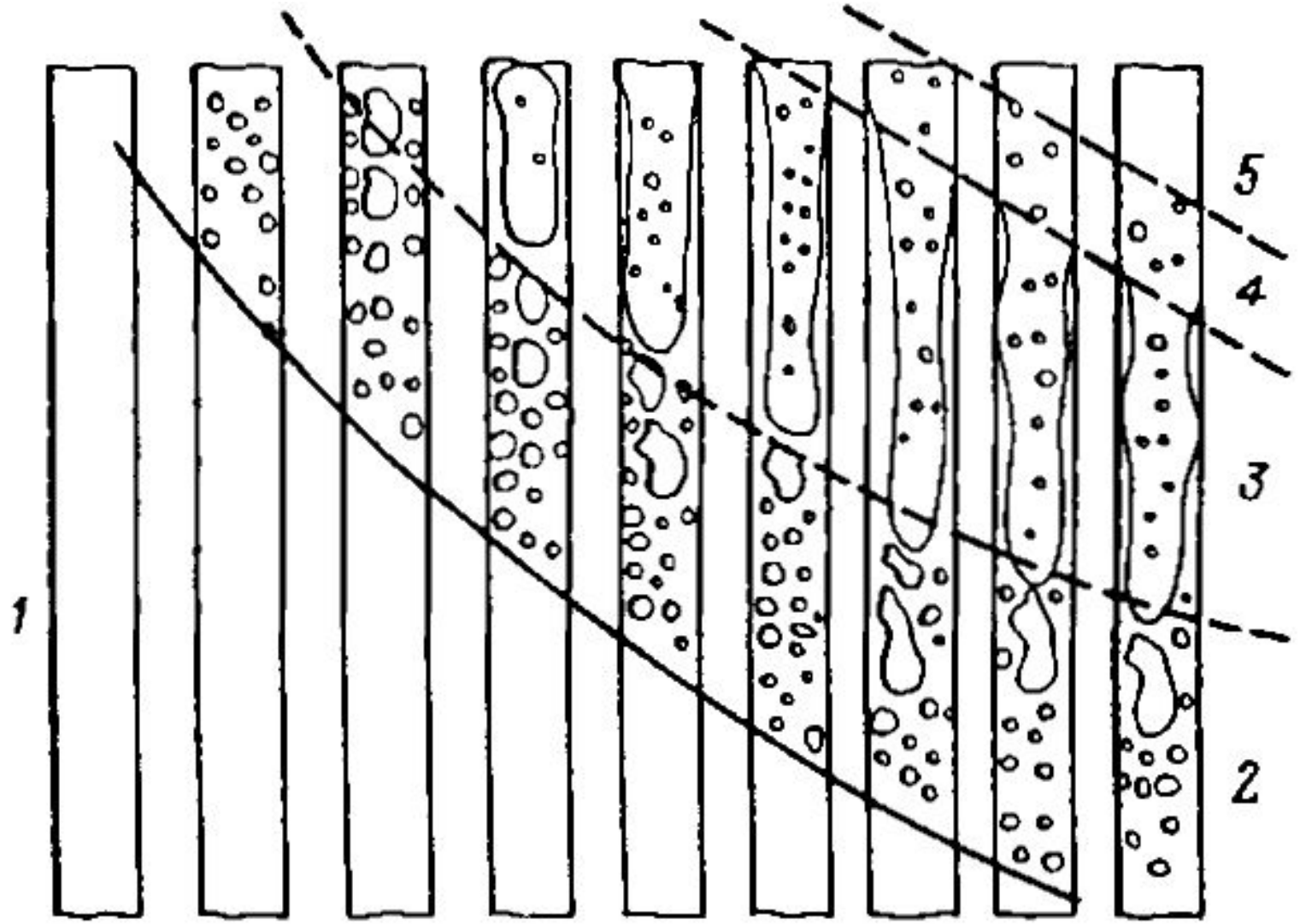


1 – пузырьковый; 2 – пробковый; 3 – эмульсионный;
4 – дисперсно-кольцевой; 5 – кольцевой; 6 – дисперсный

Модифицированная диаграмма Бейкера режимов течения пароводяной смеси в горизонтальных трубах
При температуре 293 К (20 °С) и давлении 0,1 МПа

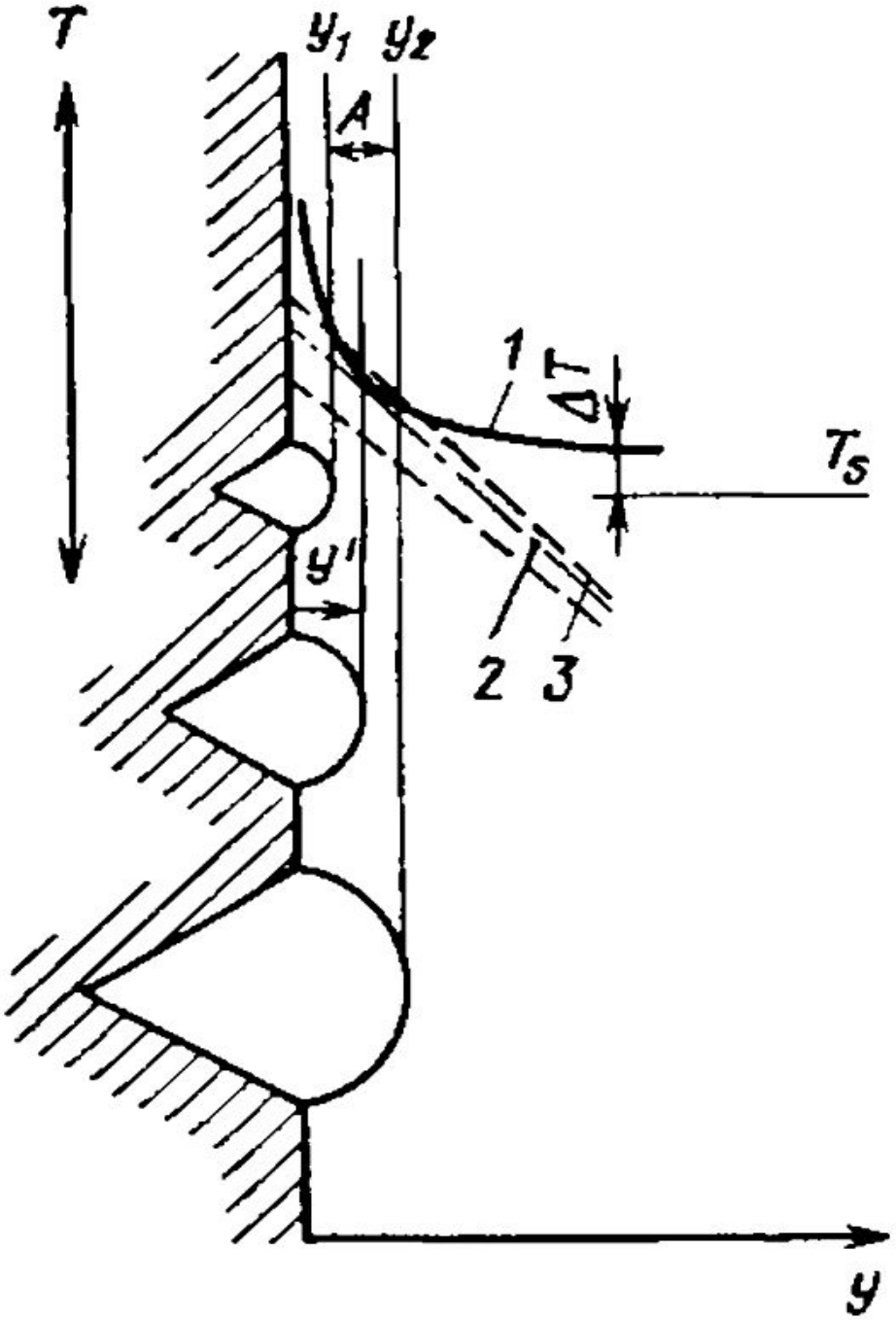


1 – пузырьковый; 2 – пробковый; 3 – пробковый; 4 – расслоенный; 5 – волновой; 6 – кольцевой; 7 – дисперсный



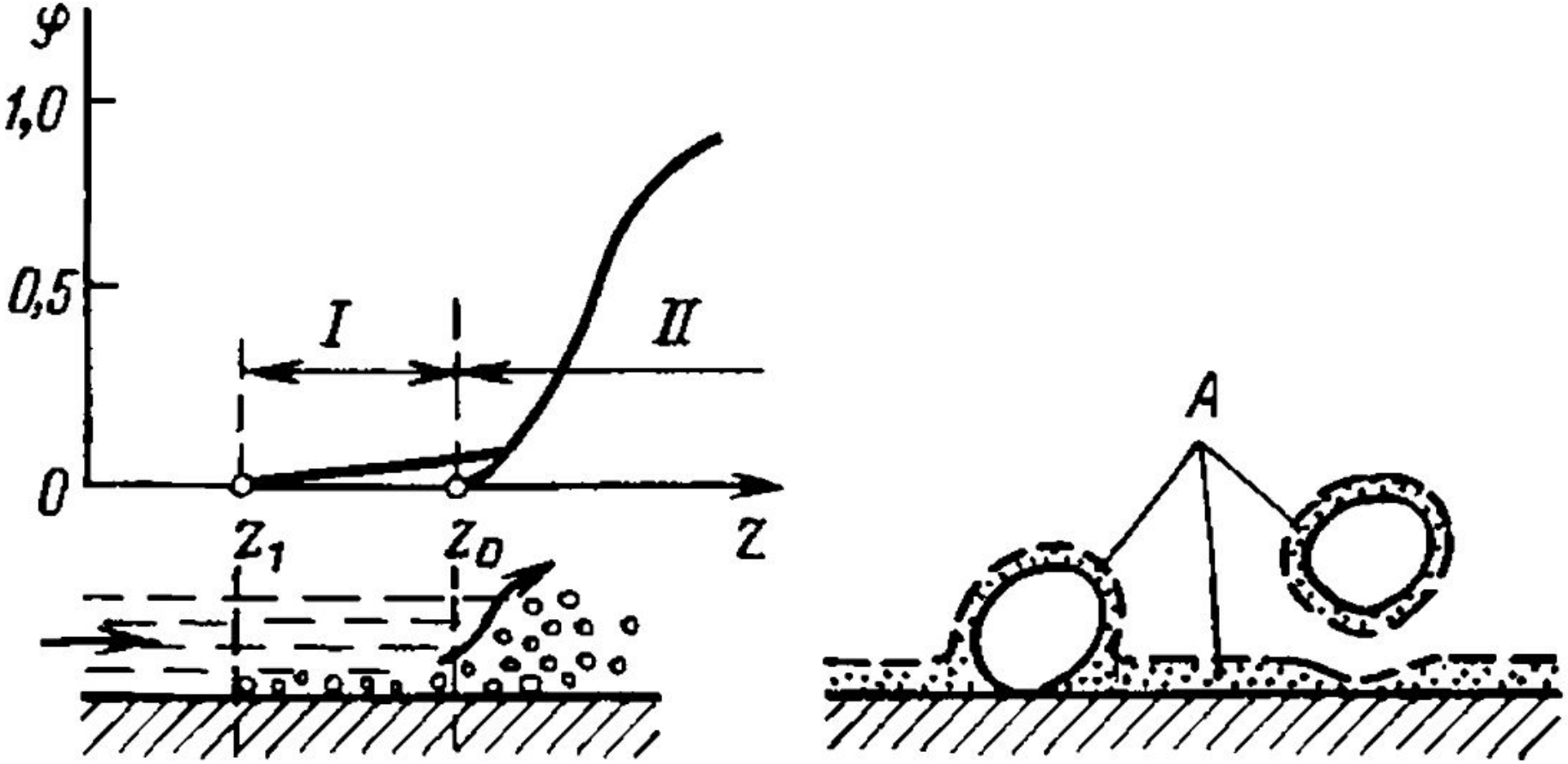
Области различных режимов течения двухфазного потока в длинной трубе (постоянные: давление, массовая скорость, энтальпия на входе; плотность теплового потока увеличивается слева – направо):

1 – однофазный поток жидкости; 2 – пузырьковый, пробковый; 3 – дисперсно-кольцевой; 4 – дисперсный; 5 – однофазный поток пара



Определение <u>начала роста парового пузырька</u> *при кипении в случае вынужденной конвекции*: ***1*** – линия необходимого перегрева жидкости; ***2*** – начало кипения; ***3*** – поле температуры в жидкости вблизи стенки; ***A*** – диапазон действующих центров парообразования при плотности теплового потока, соответствующей линии 3.

Минимальный перегрев, необходимый для начала кипения определяется касанием линии ***2*** кривой ***1***: $\Delta T=(2\sigma T_s)/(r\rho''R)$. При этом действуют центры парообразования с размерами $R=y_1$. При больших плотностях теплового потока (линия ***3***) диапазон действующих центров парообразования расширяется ($y1 \div y2$).

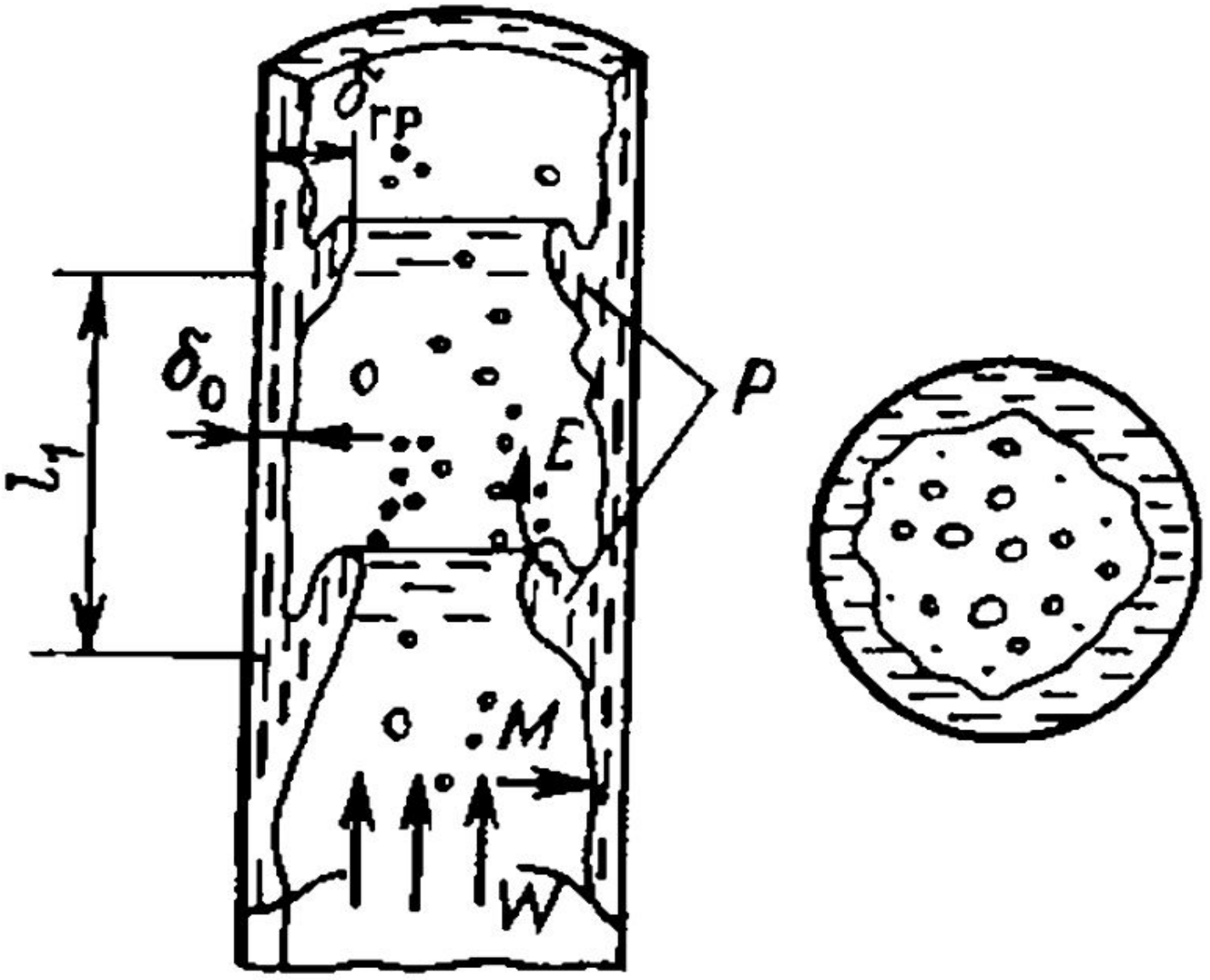


Две зоны в профиле паросодержания при кипении *недогретой* жидкости:

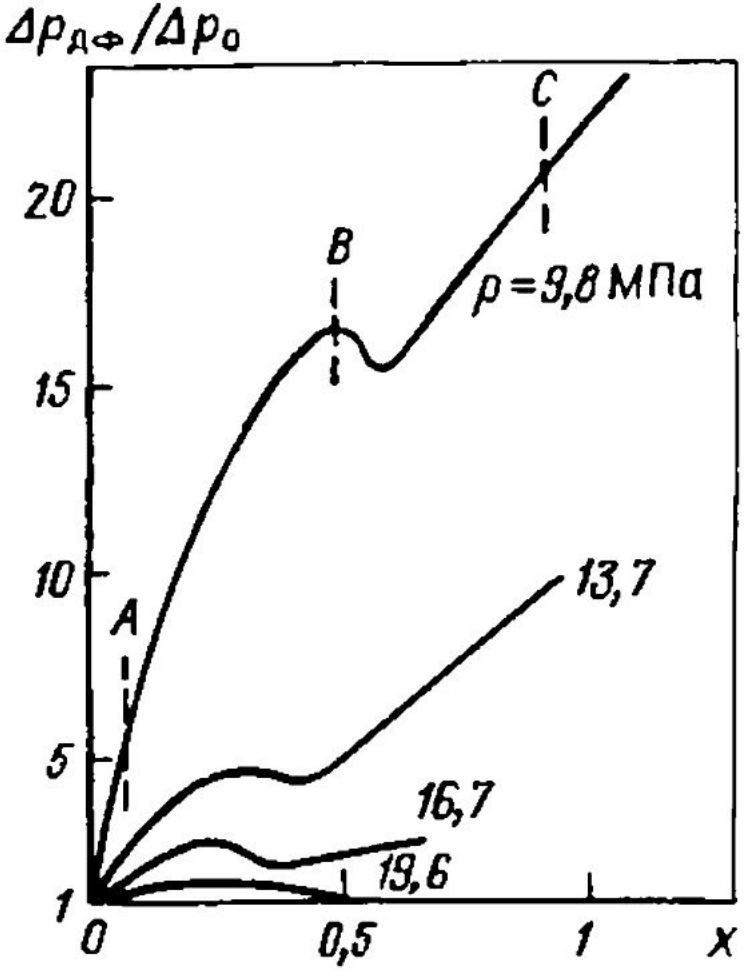
I – рост и концентрация пузырей;

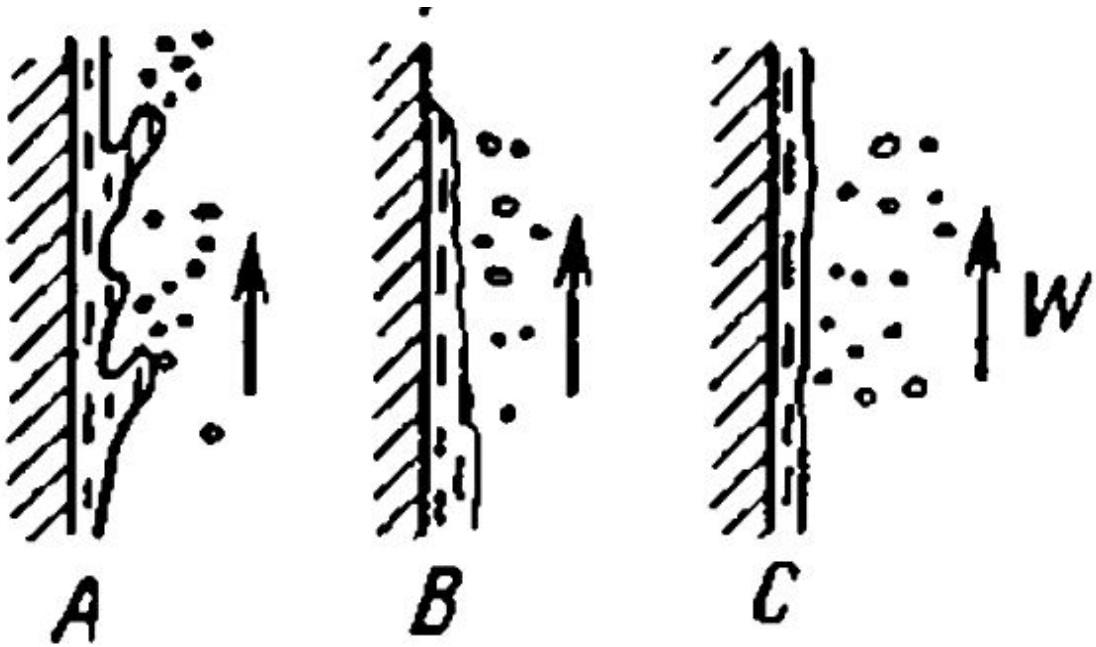
II – отрыв пузырей;

A – перегретый слой («шуба»).



Структура адиабатного дисперсно-кольцевого потока и основные процессы в нём: ***M*** – выпадение капель; ***E*** – унос с гребней волн; ***P*** – роликовые волны





Зависимость $\Delta P_{\partial\phi}/\Delta P_0$ от x и P для $G=const$

и

схемы структуры течения плёнки для пароводяного потока

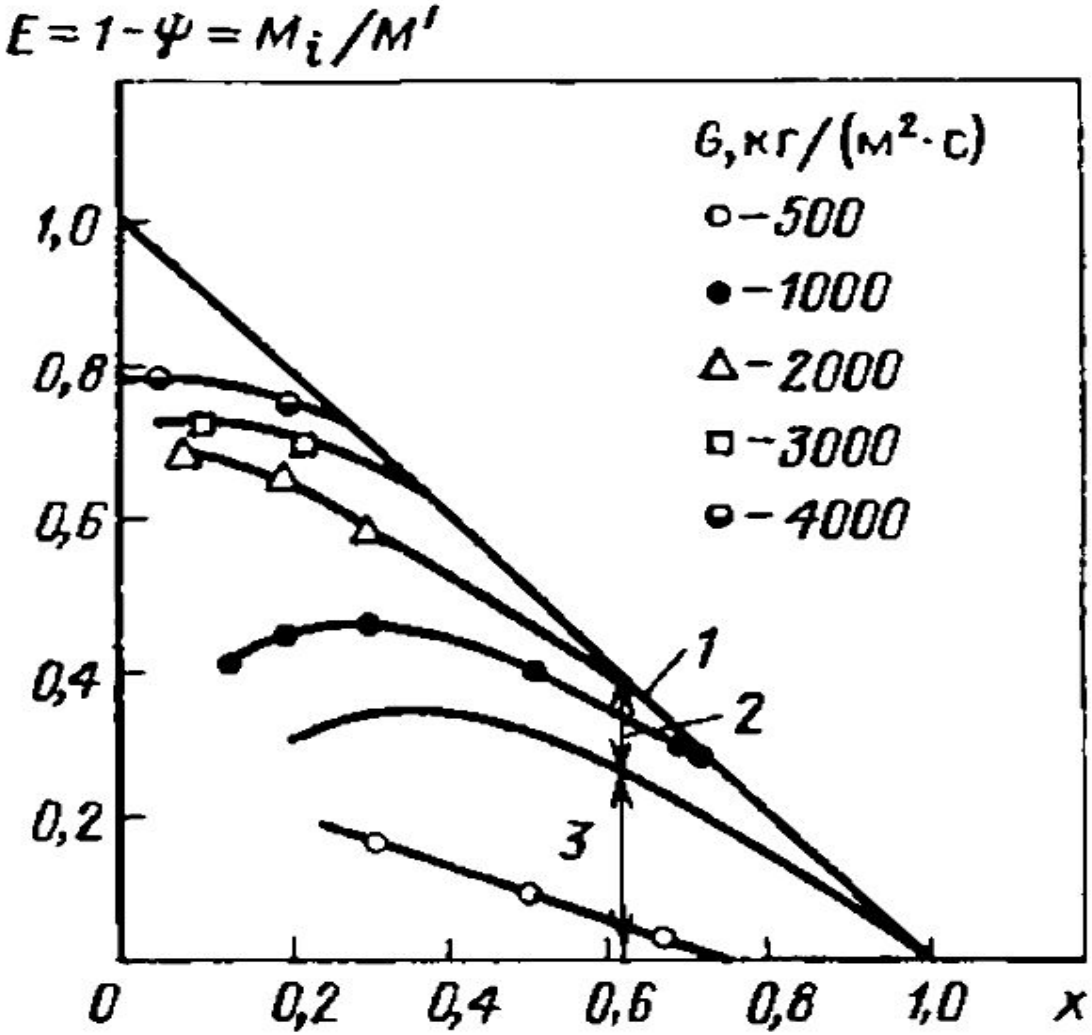


ДИАГРАММА УНОСА – диаграмма расхода жидкости в ядре потока в зависимости от относительной энтальпии

P = 7 Мпа ; d = 13.0 мм

1 – изменение полного расхода жидкости;

2 – изменение расхода жидкости в плёнке ($M_{ПЛ}/M'$);

3 – изменение расхода жидкости в ядре потока ($M_{Я}/M'$).

Капли в потоке пара подвергаются действию многих сил: силы тяжести F_T, силы Архимеда F_A , силы сопротивления F_c (компонентами которой являются F_{cx}, F_{cy}), поперечной силы Жуковского-Магнуса возникающей из-за того, что скорость пара по разные стороны капли не одинакова (компоненты этой силы F_{nx}, F_{ny}).

Если стенка нагрета и капля испаряется с одной стороны, на неё действует еще и реактивная сила Мещерского F_p.

В зависимости от совокупности действия всех сил капли могут выпадать на стенку или отбрасываются в ядро потока.

В зависимости от давления, массовой скорости, паросодержания и плотности теплового потока выделяются *две структурные формы дисперсного пароводяного потока*:

расслоенная
и
гомогенная.

1 – скорость капли меньше скорости пара;
2 – скорость капли больше скорости пара;
3 – профиль скорости пара;
➔ – равнодействующая всех сил.

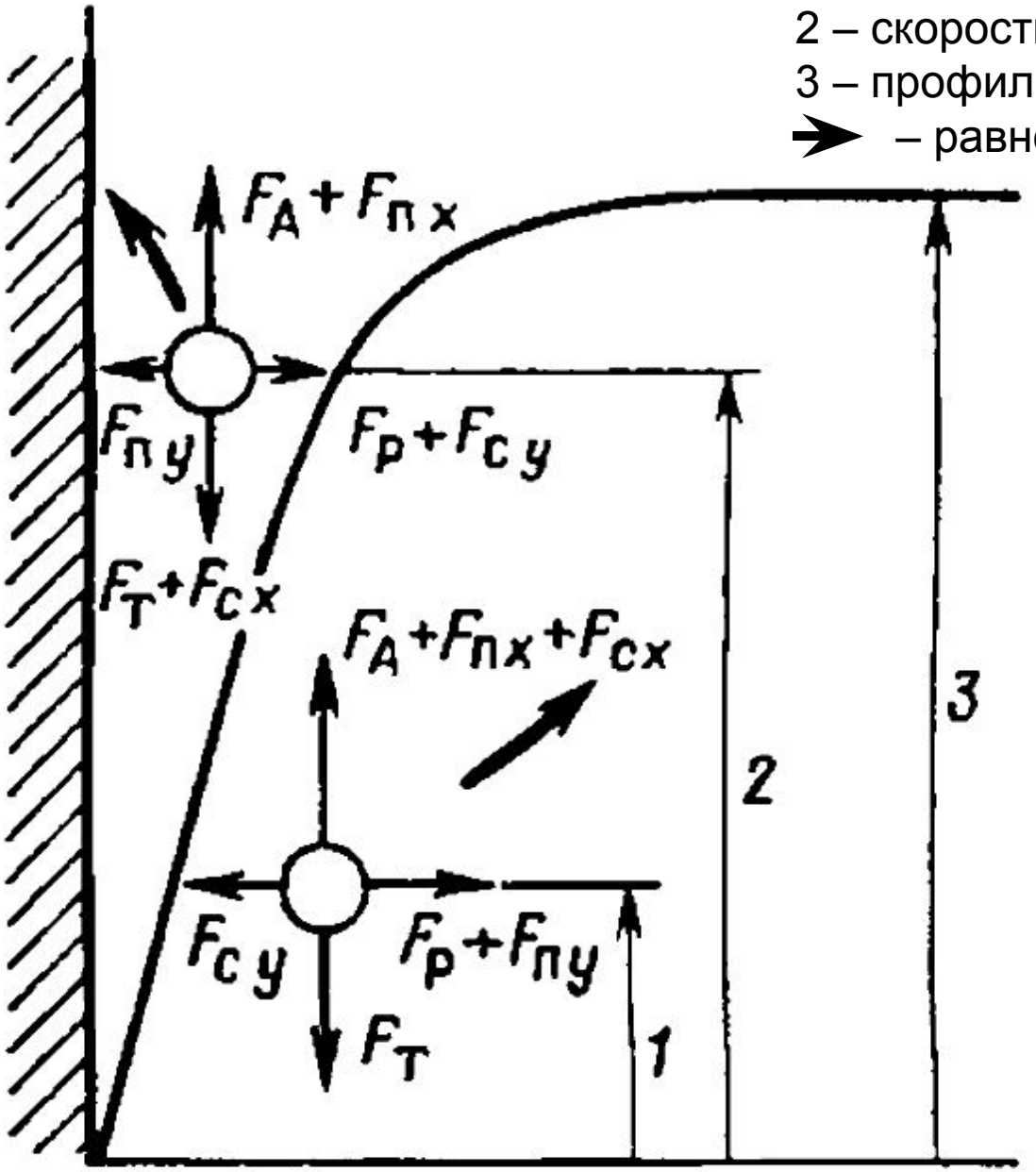
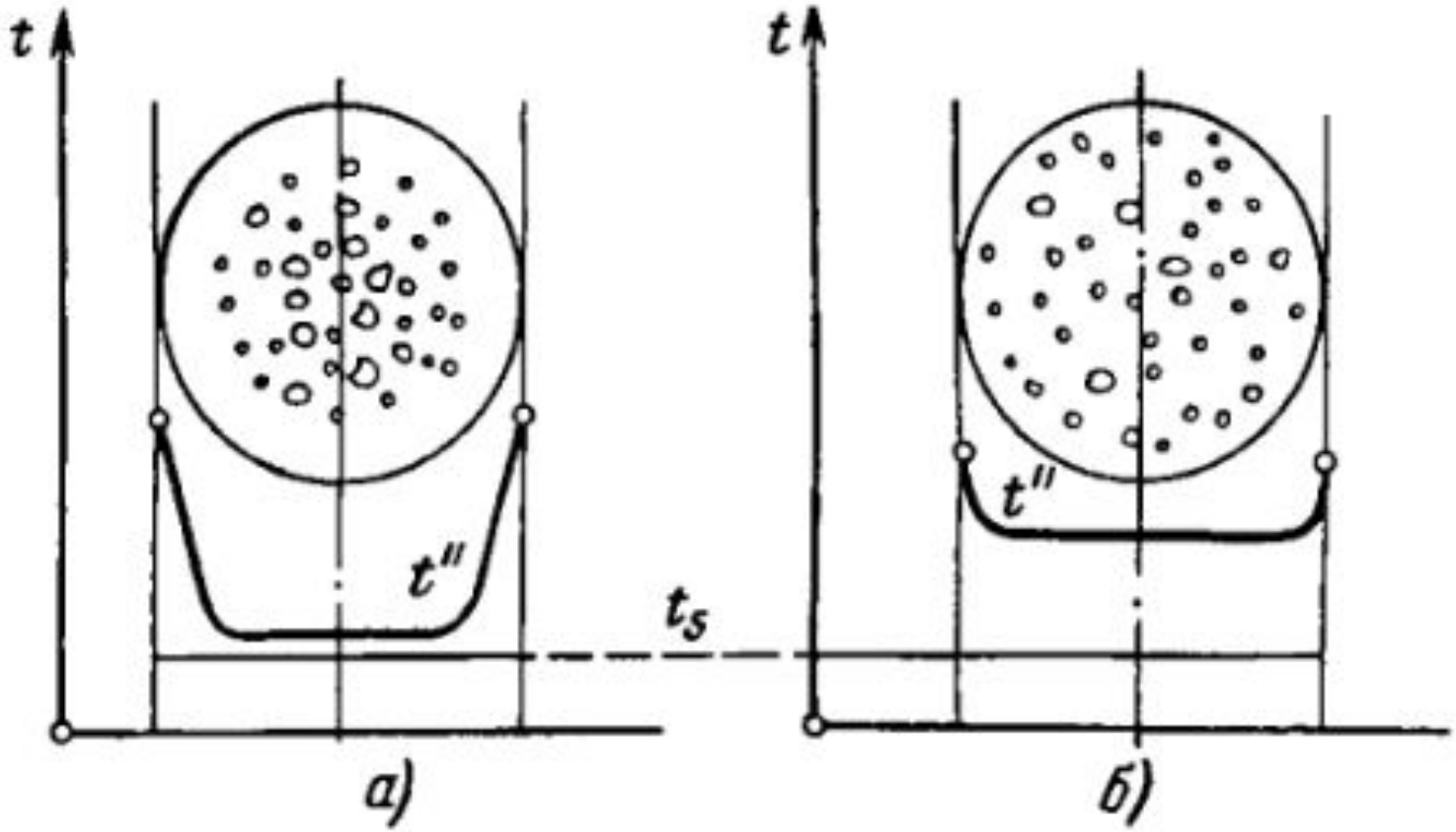


Схема сил, действующих на каплю в потоке пара

Теплообмен при вынужденном течении двухфазных потоков без испарения в каналах имеет общие черты отчасти с процессами теплообмена при турбулентном течении однофазной жидкости, а частично с процессами при кипении в большом объёме.



Структурные формы дисперсного потока:
а – неоднородная (расслоенная); б – однородная (гомогенная)

Вопросы, выносимые на зачёт

1. Двухфазные потоки. Классификация.
   Паросодержание (виды, определения – формулировки).
   Коэффициент скольжения. Скорость скольжения. Массовая скорость.
   Относительная балансная энтальпия.
   Режимы адиабатного течения в вертикальных и горизонтальных трубах.

ДЗЯКУЙ
ЗА ЎВАГУ

СПАСИБО
ЗА ВНИМАНИЕ

THANK FOR
YOUR ATTENTION