

# Выпаривание

- **Выпариванием** называется концентрирование растворов практически нелетучих или малолетучих веществ в жидких летучих растворителях путем удаления паров растворителя за счет кипения.
- Процесс выпаривания применяется для концентрирования растворов высококипящих веществ (растворы щелочей, солей, некоторых минеральных и органических кислот, многоатомных спиртов и др.).
- Например, при получении каустической соды раствор  $\text{NaOH}$  упаривается до концентрации 50-60 %, а в сахарном производстве сахарный раствор – до 65%. Процесс выпаривания может сопровождаться кристаллизацией растворенных веществ. Иногда целью выпаривания является получение растворителя в чистом виде (при опреснении морской воды). Раствор, поступающий на выпаривание, называется **исходным** раствором, а удаляемый концентрированный раствор – **упаренным**.

- Тепло, необходимое для кипения раствора, может подводиться различными способами. Однако наибольшее распространение получил в качестве греющего агента водяной пар, который называют **греющим** или **первичным**.
- Пар растворителя, который образуется при выпаривании кипящего раствора, называют **вторичным**.
- Вторичный пар может использоваться в качестве греющего пара при многократном выпаривании либо для нужд, не связанных с выпариванием, в последнем случае он называется **экстра-паром**.

Выпарные установки кроме выпарных аппаратов включают и вспомогательное оборудование (конденсаторы, теплообменники, насосы и др.).

- Выпарной аппарат состоит из следующих основных частей:
- **греющей камеры**, в которой нагревают раствор до требуемой температуры;
- **испарительной (кипятильной)** камеры, где происходит испарение (кипение) растворителя;
- **сепаратора**, обеспечивающего отделение капелек жидкого раствора от образующихся паров; устройств, обеспечивающих циркуляцию и транспортировку раствора.
- Части аппарата могут совмещаться и выполнять несколько функций.

# ***Способы выпаривания***

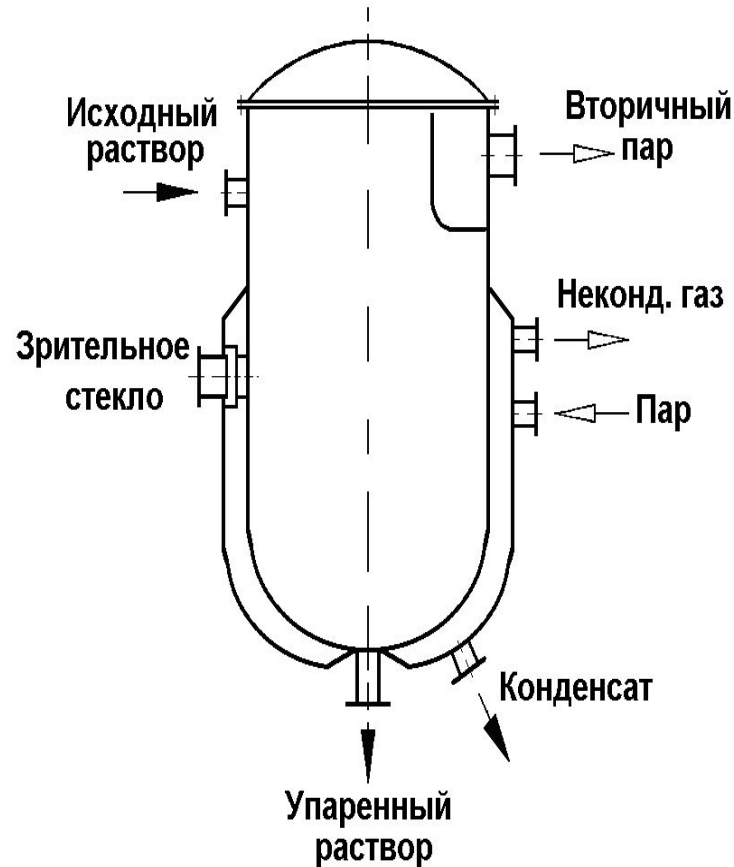
подразделяются в зависимости от различных признаков.

- 1. В зависимости от давления различают ***выпаривание под избыточным давлением, под атмосферным давлением и под вакуумом.***
- 2. В зависимости от использования вторичного пара различают: ***простое выпаривание, многократное выпаривание и выпаривание с тепловым насосом.***

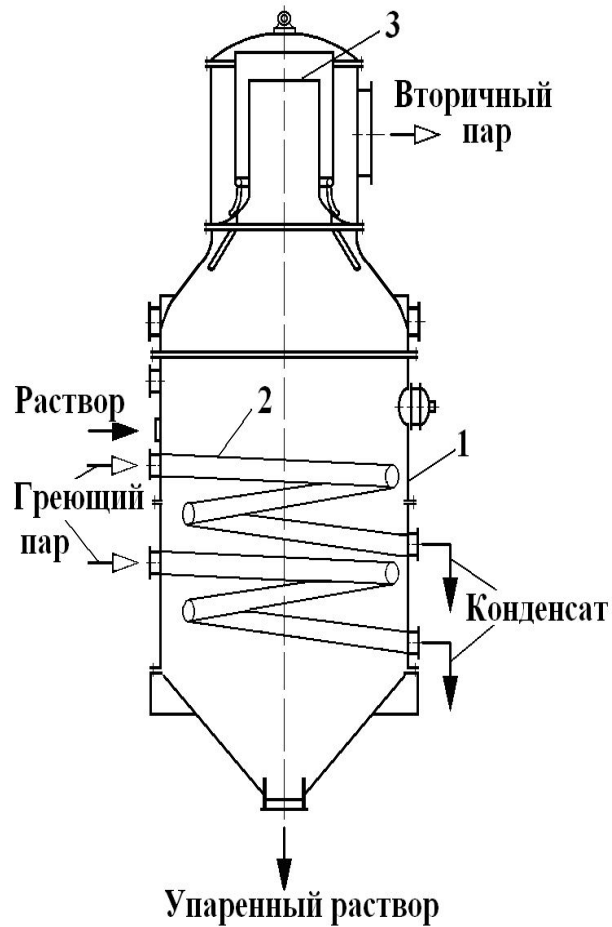
# Классификация выпарных аппаратов

- 1. По способу организации процесса во времени выпарные аппараты могут быть периодического и непрерывного действия.
- 2. В зависимости от организации кипения выпариваемого раствора аппараты можно подразделить: с парообразованием в зоне теплообмена; адиабатное испарение; парообразование при непосредственном контакте с теплоносителем.
- 3. По агрегатному состоянию теплоносителя, используемому в качестве греющего агента, аппараты можно подразделить на: использующие теплоноситель в газообразном (продукты сгорания, горячий воздух), парообразном (водяной пар), жидком (вода, масло, высокотемпературные теплоносители и др.), твердом состоянии или обогрев ведется с помощью электричества. Наиболее распространен обогрев водяным паром
- 4. По типу циркуляции раствора в аппаратах различают аппараты с естественной и принудительной циркуляцией, а также без циркуляции раствора (прямоточные). Естественная циркуляция раствора может быть свободной (неорганизованной) или направленной (организованной).
- 5. По типу поверхности нагрева – поверхностные (трубчатые, змеевиковые, аппараты с рубашкой и т.д.) и контактные (при непосредственном контакте с нагревающим агентом.)
- 6. По ориентации греющей камеры в пространстве – аппараты с вертикальной, горизонтальной, наклонной камерами.

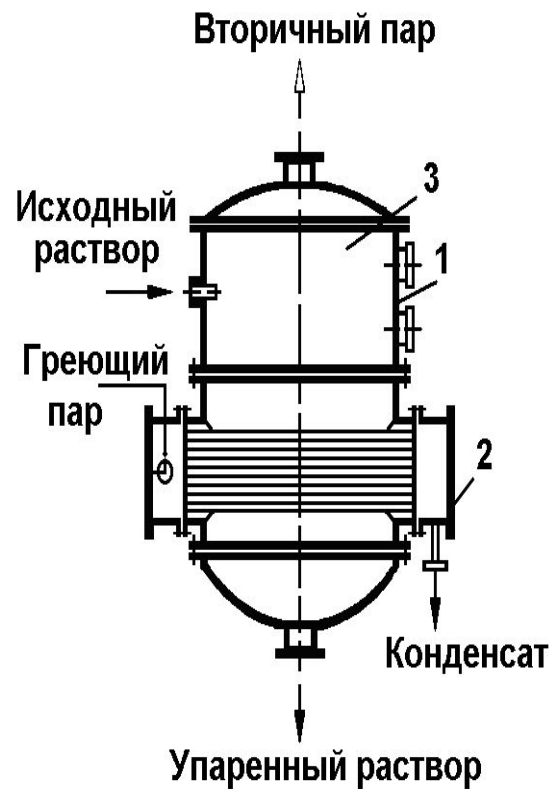
# Конструкции выпарных аппаратов



- *Выпарной аппарат с паровой рубашкой*

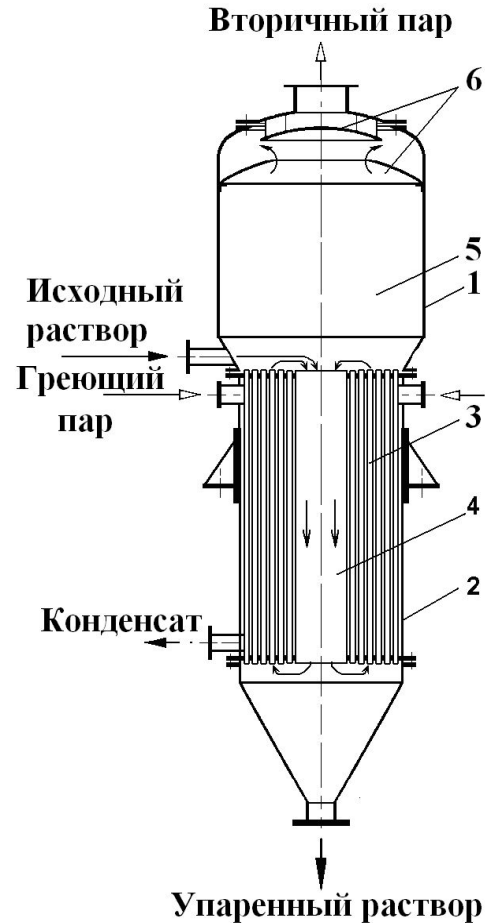


- *Змеевиковый выпарной аппарат:  
1 – корпус; 2 – секции змеевика; 3 –  
брызгоуловитель*

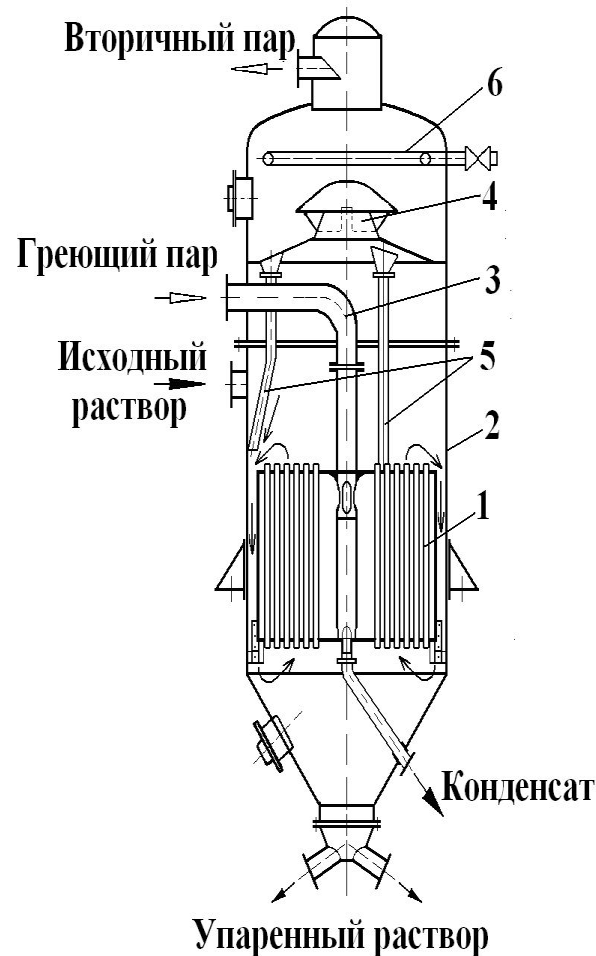


- *Выпарной аппарат с горизонтальной трубчатой греющей камерой и вертикальным цилиндрическим корпусом: 1 – корпус; 2 – трубчатая греющая камера; 3 – сепарационное пространство*

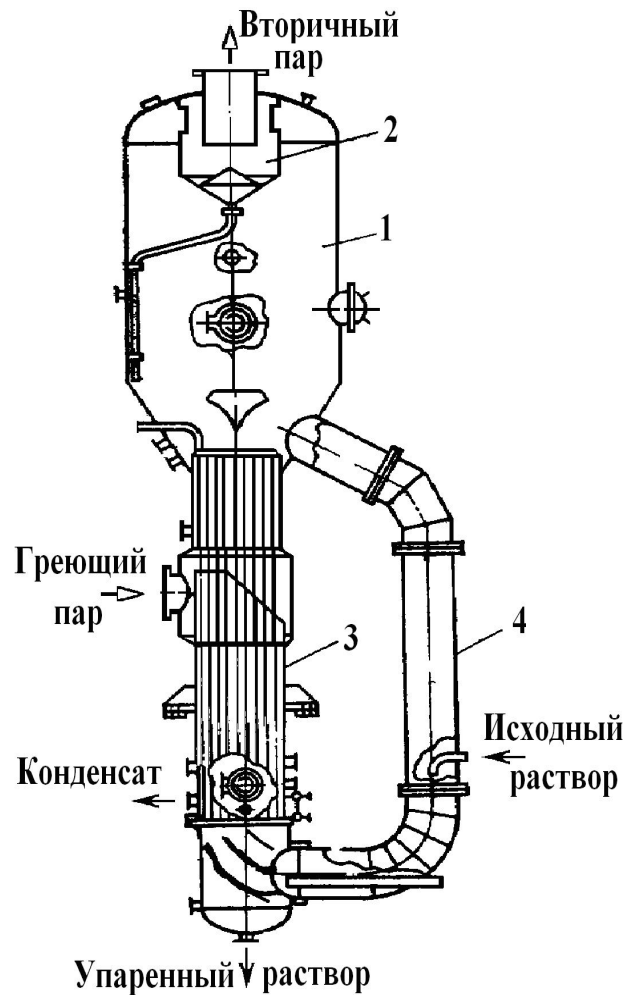




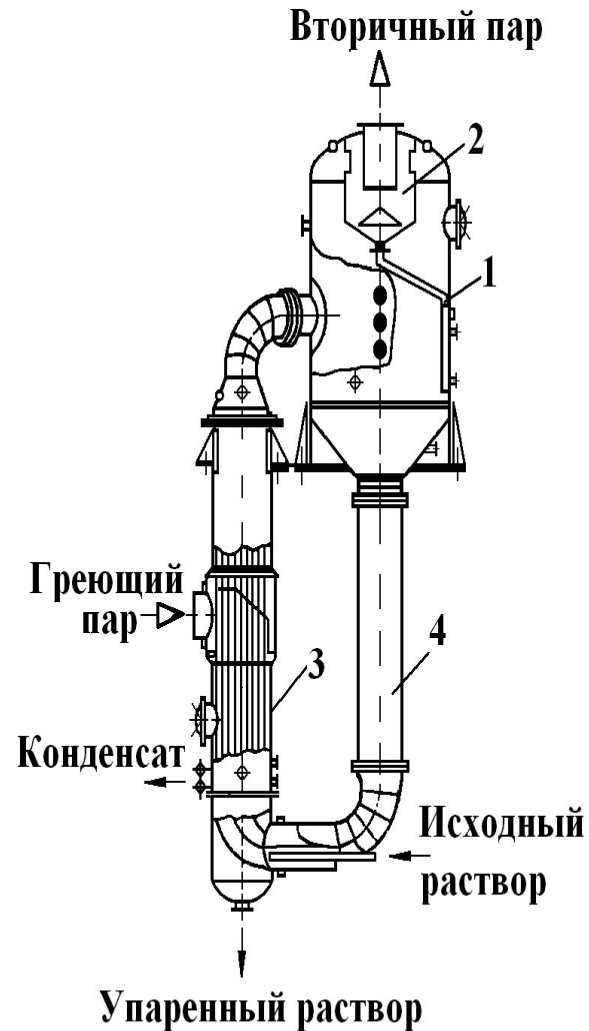
- *Выпарной аппарат с соосной греющей камерой и центральной циркуляционной трубой: 1 – корпус; 2 – греющая камера; 3 – кипяtilьные трубы; 4 – циркуляционная труба; 5 – сепаратор; 6 – брызгоуловитель*



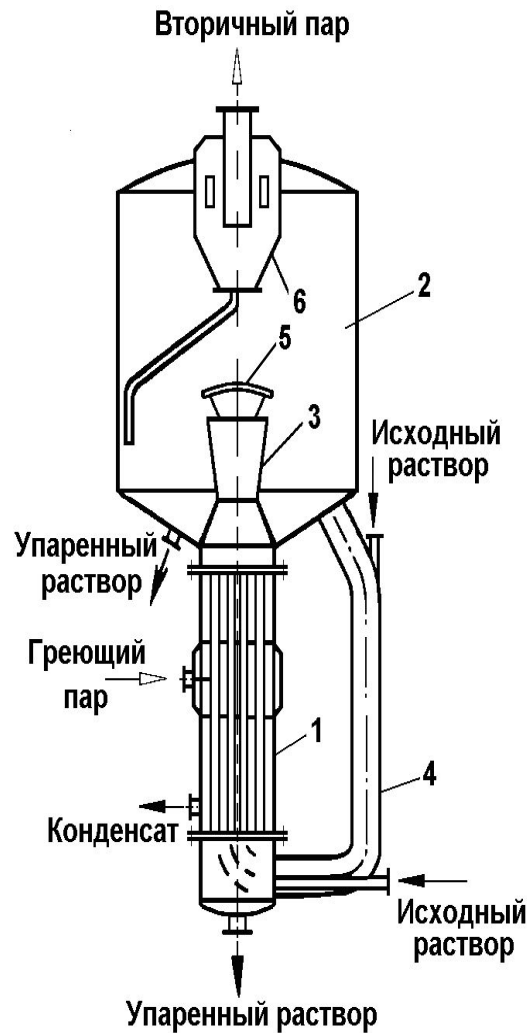
- *Выпарной аппарат с подвесной греющей камерой: 1 – греющая камера; 2 – корпус; 3 – паровая труба; 4 – брызгоуловитель; 5 – сливные трубы; 6 – перфорированная труба для промывки*



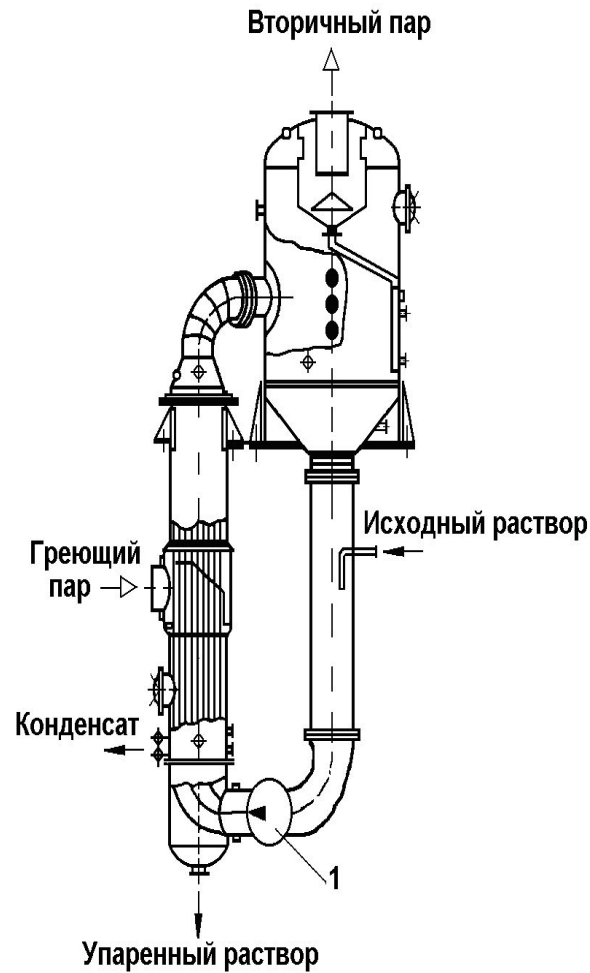
- *Выпарной аппарат с соосной греющей камерой и выносной циркуляционной трубой:  
 1 – сепаратор; 2 – брызгоуловитель; 3 – греющая камера; 4 – циркуляционная труба*



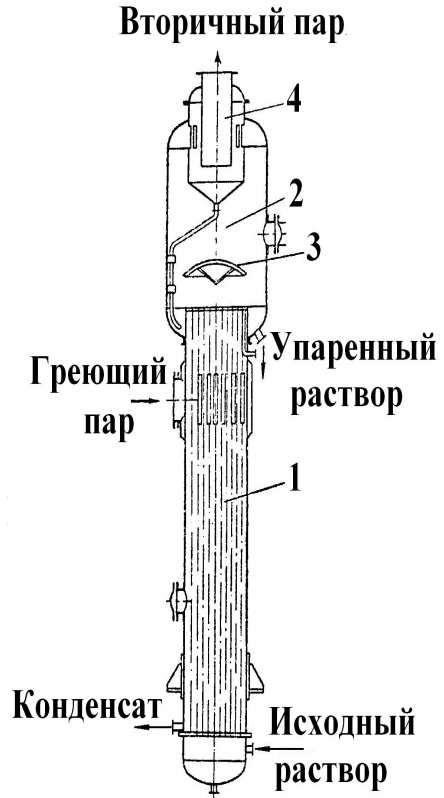
- *Выпарной аппарат с выносной греющей камерой: 1 – сепаратор; 2 – брызгоуловитель; 3 – греющая камера; 4 – циркуляционная труба*



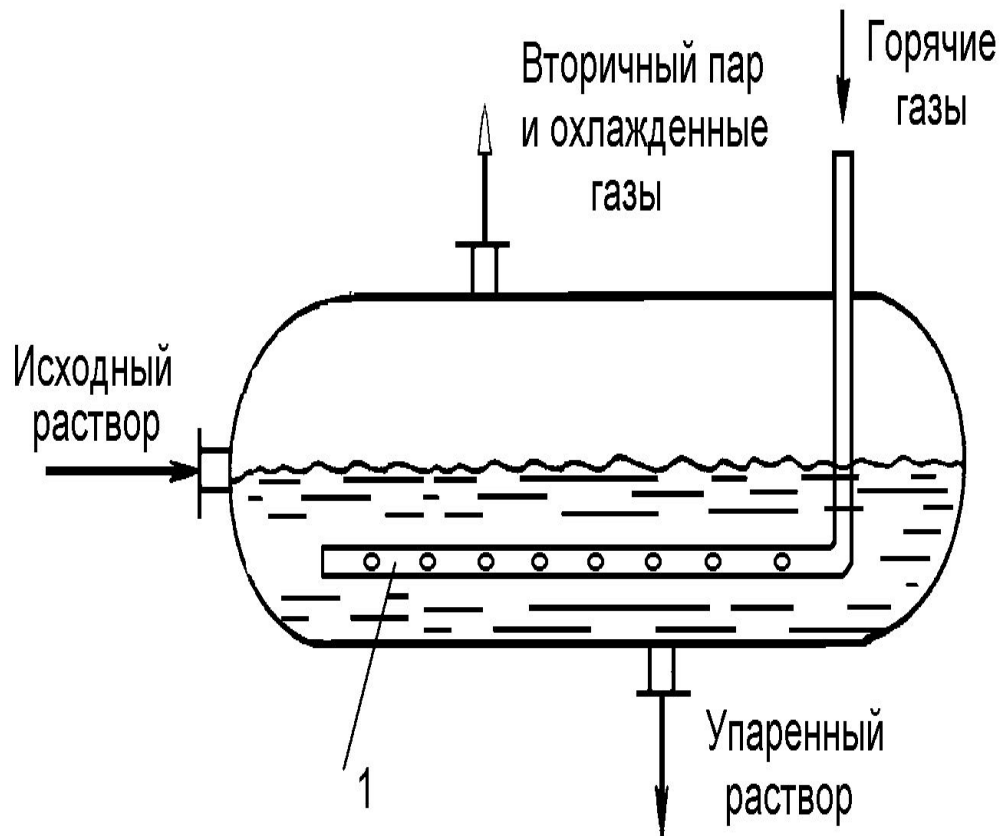
- *Выпарной аппарат с вынесенной зоной кипения: 1 – греющая камера; 2 – сепаратор; 3 – испарительная труба; 4 – циркуляционная труба; 5 – каплеотбойник; 6 – брызгоуловитель*



- *Выпарной аппарат с принудительной циркуляцией раствора: 1 – насос*

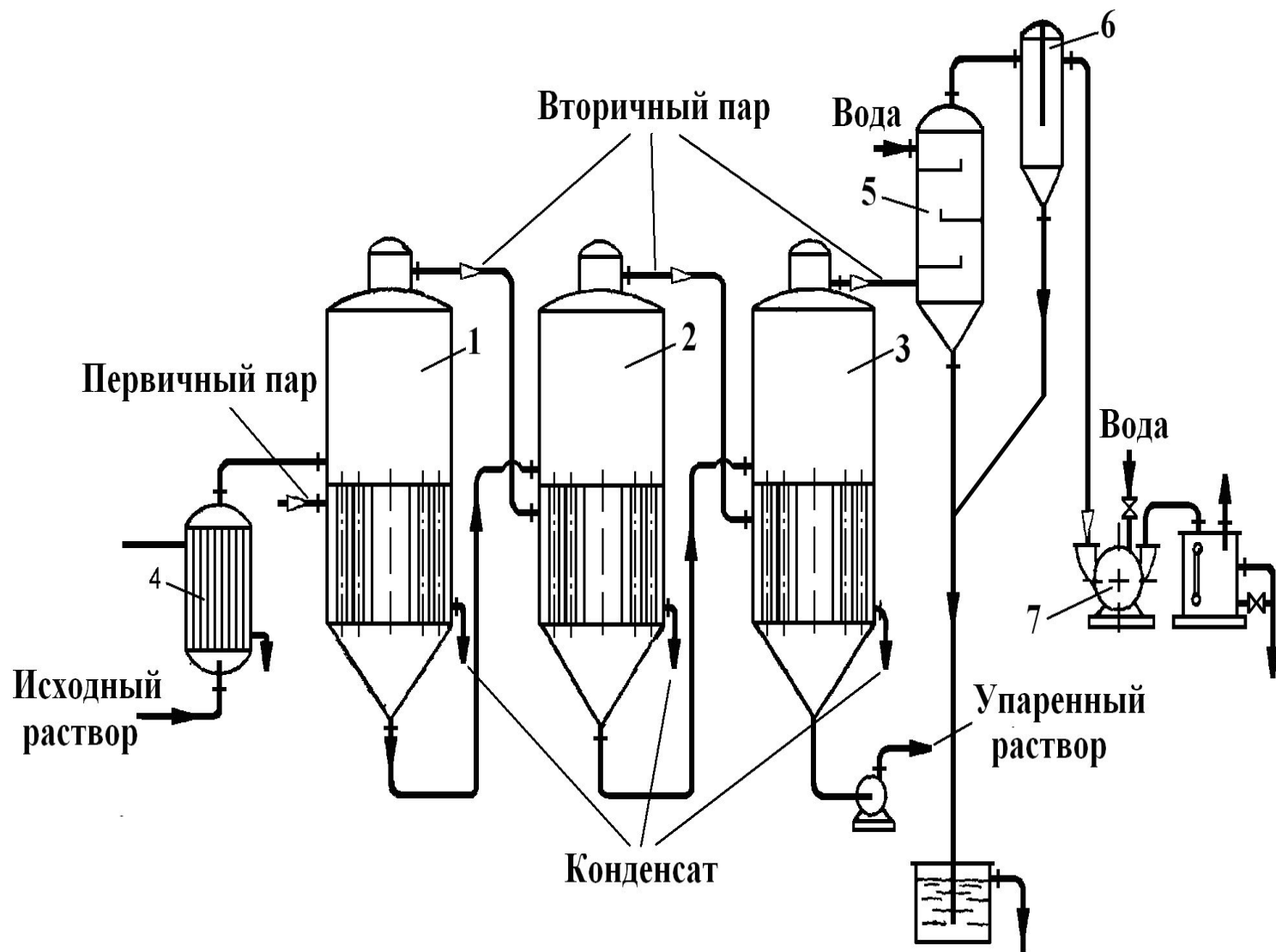


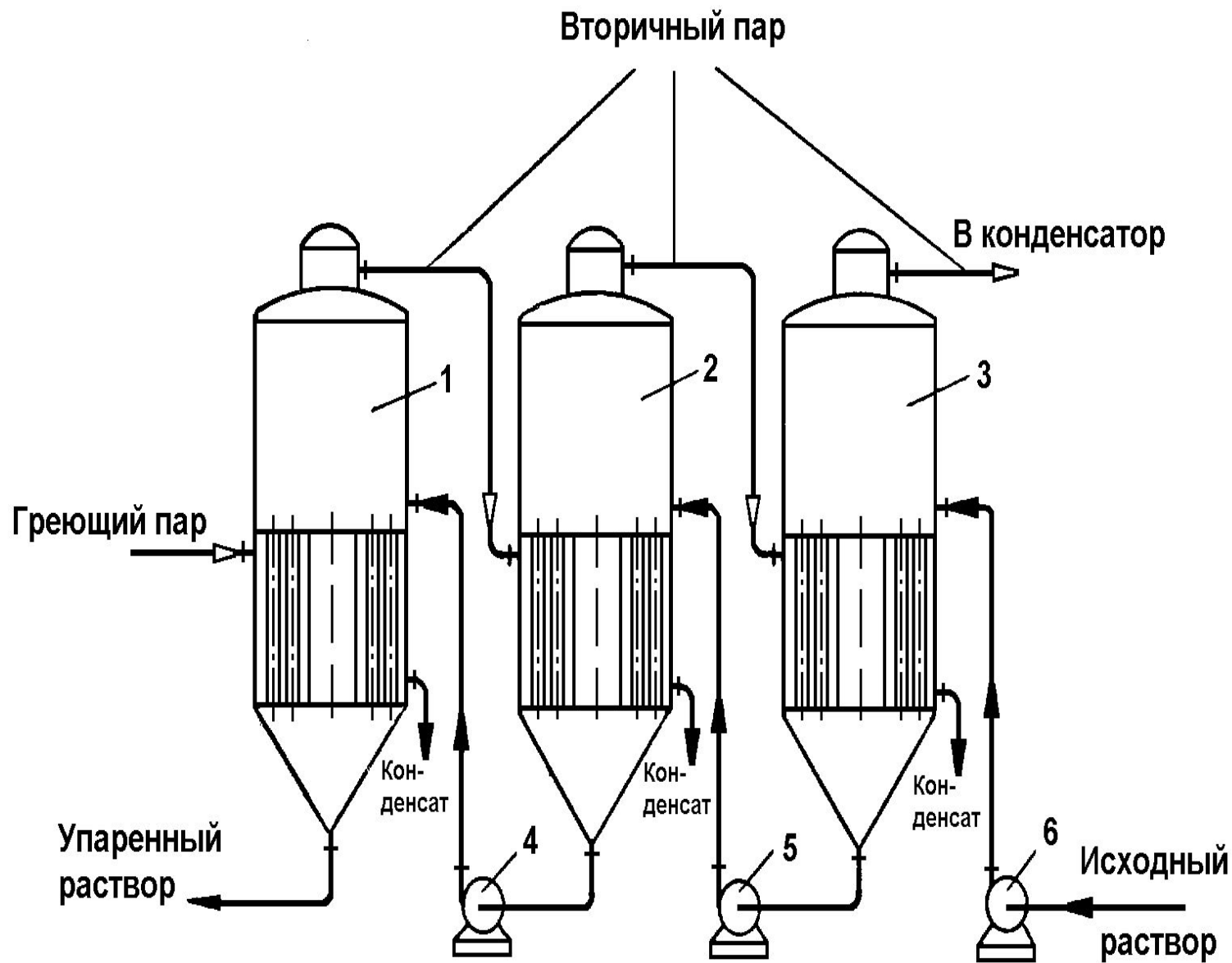
- *Вертикальный пленочный выпарной аппарат с восходящим движением пленки: 1 – греющая камера; 2 – сепаратор; 3 – брызгоотбойник; 4 – брызгоуловитель*

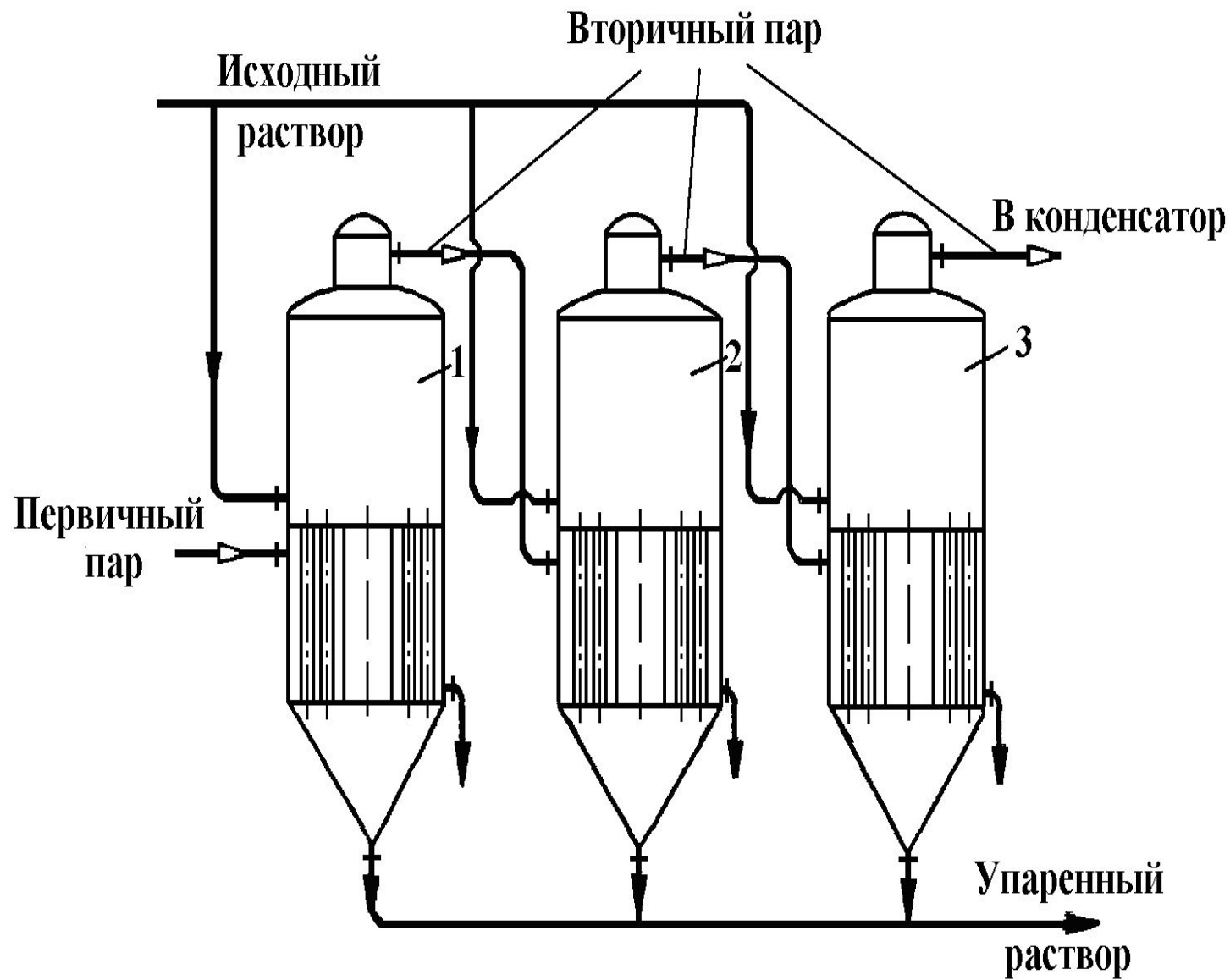


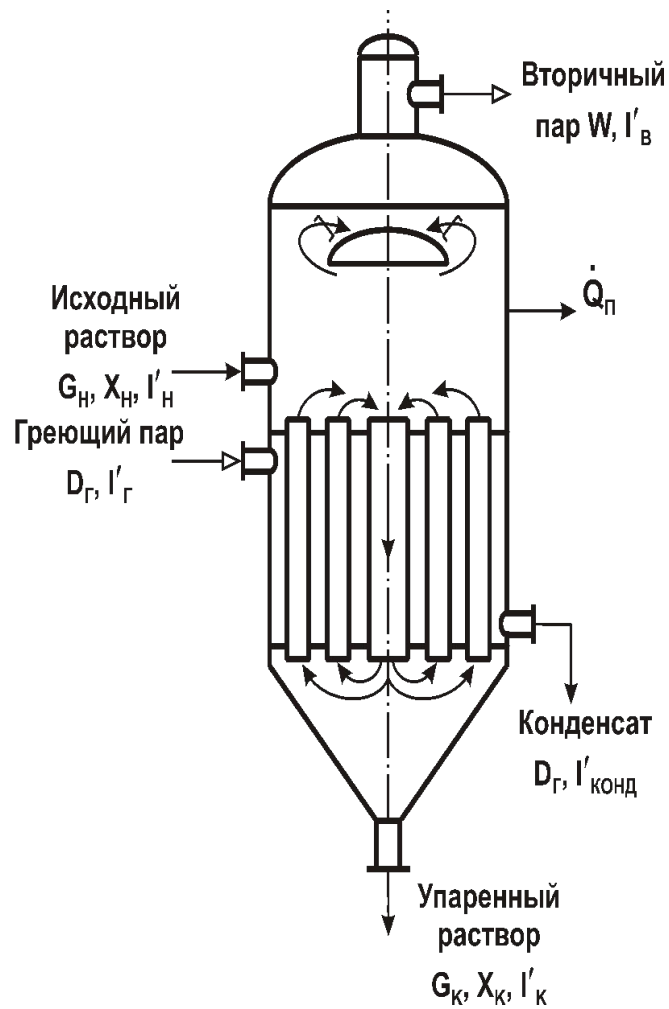
- *Барботажный выпарной аппарат: 1 – барботер*











$$G_H = G_K + W$$

$$G_H X_H = G_K X_K$$

*Схема массовых и тепловых потоков выпарного аппарата. Материальный баланс*

# Тепловой баланс

Приход тепла  $\sum_{i=1}^m \dot{Q}_{\text{вх},i}$ :

с исходным раствором  $\dot{Q}_H = G_H I'_H$ ,

с греющим паром  $\dot{Q}_Г = D_Г I'_Г$ .

Расход тепла  $\sum_{j=1}^n \dot{Q}_{\text{вых},j}$ :

с упаренным раствором  $\dot{Q}_K = G_K I'_K$ ,  
с вторичным паром

$\dot{Q}_В = W I'_В$ ,

с конденсатом  $\dot{Q}_{\text{конд}} = D_Г I'_{\text{конд}}$ ,

с потерями в окружающую среду  $\dot{Q}_П$ .

# Температурные потери

- **Температурными потерями** называют разность температур кипения раствора  $T_K$  и вторичного пара  $T_B$ :

$$\Delta T_{\text{пот}} = T_K - T_B$$

Если температура вторичного пара рассматривается непосредственно над кипящим раствором  $T'_B$ , то температурные потери складываются из **температурной (концентрационной) депрессии  $\Delta T_{\text{т.д.}}$** , обусловленной увеличением температуры кипения раствора по сравнению с чистым растворителем, и **гидростатической депрессии  $\Delta T_{\text{г.э.}}$** , вызванной повышением температуры кипения растворителя за счет гидростатического эффекта:

$$\Delta T'_{\text{пот}} = \Delta T_{\text{т.д.}} + \Delta T_{\text{г.э.}}$$

# Температурные потери

- Если же температура вторичного пара рассматривается на входе в последующий корпус многокорпусной выпарной установки  $T''_в$ , то при определении температурных потерь добавляется третья составляющая – **гидродинамическая (гидравлическая) депрессия  $\Delta T_{г.с.}$** , обусловленная падением температуры вторичного пара, вследствие гидравлических сопротивлений (потерь давления) при прохождении пара через сепаратор и трубопроводы

$$\Delta T''_{пот} = \Delta T_{т.д.} + \Delta T_{г.э.} + \Delta T_{г.с.}$$

$$\Delta T_{т.д.} = T_{к.р-ра} - T_{к.р-ля}$$

## Схема расчета многокорпусной выпарной установки

1. Из уравнений материального баланса, рассматривая всю установку в целом, определяются количество удаленного растворителя расход получаемого упаренного раствора:

$$W = G_H \left( 1 - \frac{X_H}{X_k} \right)$$

$$G_k = G \frac{X_H}{X_k}$$

2. В первом приближении задается число корпусов  $N$  и распределение на основе практического опыта нагрузки по выпариваемому растворителю по корпусам:

$$W_1 : W_2 : \dots : W_i : \dots : W_N = 1 : c'_2 : \dots : c'_i : \dots : c'_N,$$

$$\text{где } c'_1 = 1, \quad c'_i = c'_{i-1} + 0,1; \quad i = \overline{2, N},$$



3. Производится расчет концентраций и расходов растворов на выходе из корпусов

$$X_i = \frac{G_{i-1} \cdot x_{i-1}}{G_i} \quad G_i = G_{i-1} - W_i,$$

4. Производится распределение в первом приближении перепада давлений между корпусами поровну ( $\Delta p_i = \text{idem}$ ) и определение давлений, температур и энтальпий греющих и вторичных паров в корпусах:

$$\Delta p_i = \frac{p_{\text{г.п.}} - p_{\text{б.к.}}}{N} \quad p_{\text{г.и}} = p_{\text{г.п.}} - (i-1)\Delta p_i, \quad i = \overline{1, N}$$

5. Определение температурных потерь и температур кипения раствора в корпусах. При интенсивной циркуляции раствора в аппаратах выпаривания структура потока близка к модели идеального смешения. Поэтому концентрацию в корпусе принимают обычно равной концентрации выходящего из аппарата упаренного раствора. Таким образом, по известным концентрациям  $X_i$ , давлениям  $p'_{в,i}$  и температурам  $T'_{в,i}$  в корпусах находятся температурные потери в каждом корпусе, а затем – суммарные температурные потери всей выпарной установки. Далее определяется температура кипения растворов в корпусах:

$$T_{к,i} = T'_{в,i} + \Delta T''_{пот,i}$$

6. Определяются полезные разности температур по корпусам:

$$\Delta T_{пол,i} = T_{г,i} - T_{к,i}$$

$$\Delta T_{пол.} = \sum_{i=1}^N \Delta T_{пол,i}$$

- 7. Определяются тепловые нагрузки аппаратов, расход греющего пара  $D_r$ , производительности каждого аппарата по испаряемому растворителю  $W_i$  на основе совместного решения уравнений теплового и материального балансов по корпусам

$$Q_{r,i}^r = W_{\text{конд},i} (I'_{i-1} - I'_{i,T}) = \varepsilon (G_{r,i} - c_{r,i} (T_{i-1} - T_{i-})) +$$

$$+ W_{\text{в},i} (I'_{r,i} - c_{k,i} T_{\text{конц},i}) - Q_{\text{конц},i}, \quad i = \overline{1, N}$$

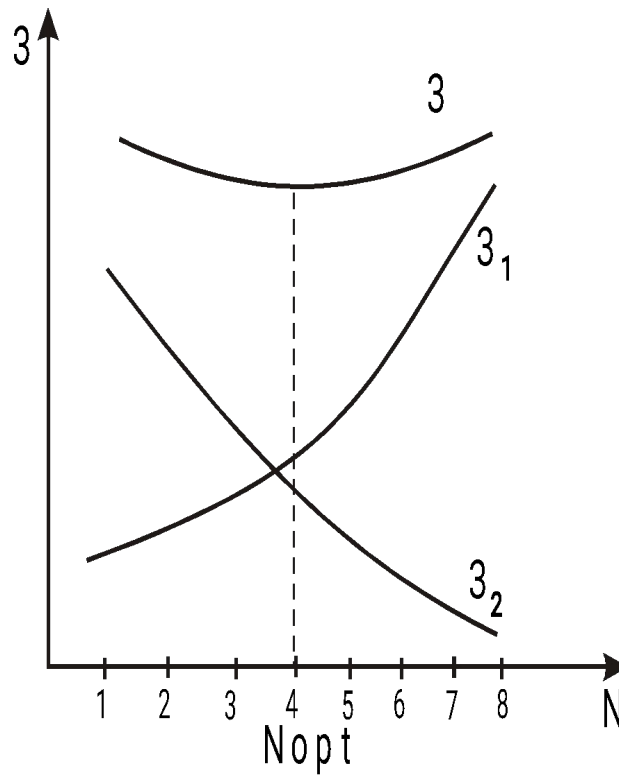
$$W = \sum_{i=1}^N W_i,$$

- 8. Рассчитываются коэффициенты теплопередачи  $K_{T,i}$  по корпусам установки. Для этого используется уравнение аддитивности термических сопротивлений и расчетные зависимости для определения коэффициентов теплоотдачи в выпарном аппарате, рассмотренные в предыдущих главах, а также имеющиеся в справочной литературе.
- 9. Производится распределение полезной разности температур по корпусам и определение поверхностей нагрева корпусов. Такое распределение проводится либо на основе равенства поверхностей теплопередачи корпусов ( $F_i = \text{idem}$ ), либо на основе обеспечения минимума поверхности теплопередачи всей установки ( $\min F$ ). Для выбора одного из этих способов необходимо рассчитать полезные разности температур  $\Delta T_{\text{пол},i}$  из уравнения теплопередачи поверхность каждого аппарата

$$F_i = \frac{\dot{Q}_i^r}{K_{T,i} \Delta T_{\text{пол},i}},$$

- 10. Выбирается оптимальное число корпусов. Как было показано выше, с увеличением числа корпусов расход греющего пара уменьшается обратно пропорционально их количеству  $D_r \sim N^{-1}$ . Однако при этом возрастают температурные потери, уменьшаются полезные разности температур, что приводит к увеличению суммарной поверхности нагрева корпусов. Можно записать суммарные затраты на функционирование выпарной установки в виде двух слагаемых, одно из которых пропорционально поверхности нагрева  $F$ , а другое – расходу греющего пара:

$$Z = Z_1 + Z_2 = AF + BD$$



- *Зависимость затрат на функционирование выпарной установки от числа корпусов*



## *Пленочный выпарной аппарат*

<https://www.youtube.com/watch?v=32K6Ee3R3Ds>



## *Выпарной аппарат с циркуляцией раствора*

<https://www.youtube.com/watch?v=y-W88BysQbo>



Film Evaporator Working Principle

<https://www.youtube.com/watch?v=bpDTcpLUoYI>



The AlfaFlash - the most effective circulation  
flash evaporation system

<https://www.youtube.com/watch?v=vxp6HsYtwdM>





Аппарат с вынесенной циркуляционной трубой

<https://www.youtube.com/watch?v=wN-TvorOwlg>



Animation of MVR Rising Film Evaporator

<https://www.youtube.com/watch?v=vG-ze17ADPl>



Выпарной аппарат - выпаривание аммиачной селитры

<https://www.youtube.com/watch?v=lnM9dFZrsOE>



Отделение выпарки и грануляции карбамида

<https://www.youtube.com/watch?v=sW7DfMh6Vqg>



Вакуум-выпарная установка для  
переработки сточных вод

<https://www.youtube.com/watch?v=xg74DMmgqlc>



Mechanical Vapor Recompression

<https://www.youtube.com/watch?v=9lm2ubpOoL4>



- Многокорпусное  
выпаривание

<https://www.youtube.com/watch?v=79pIX2LxxYc>