

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 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

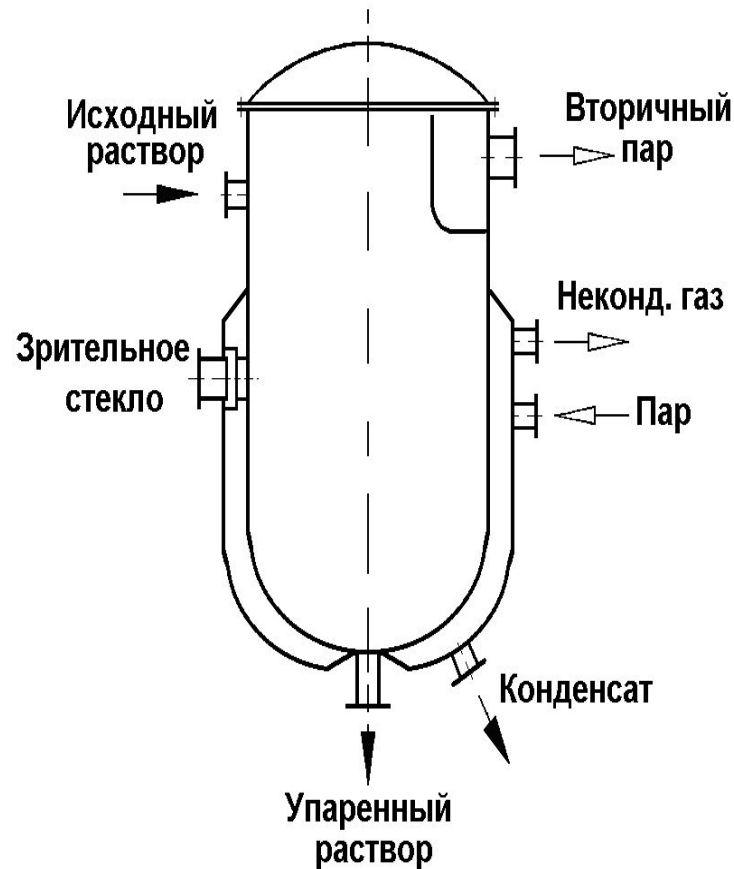
подразделяются в зависимости от различных признаков.

- 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.***

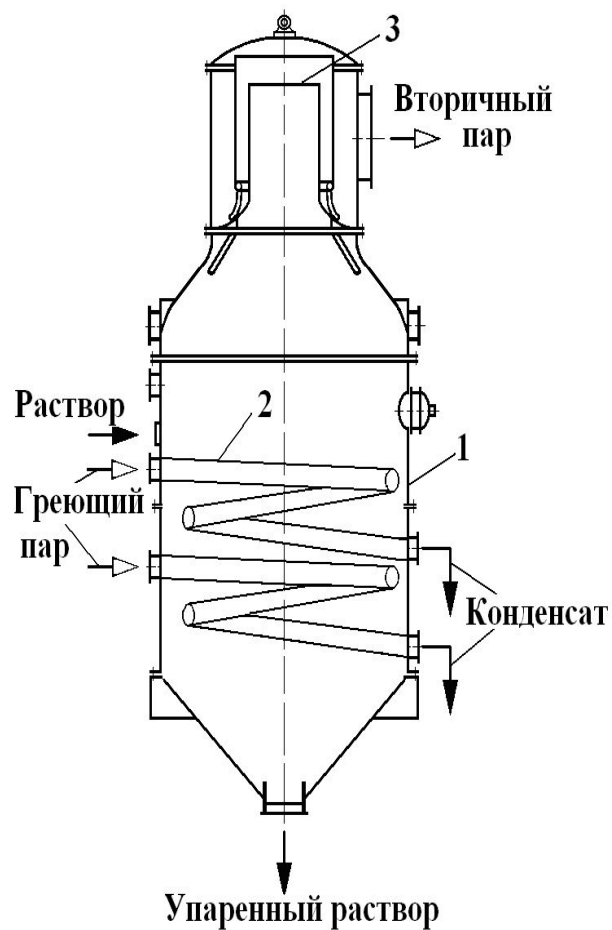
Классификация выпарных аппаратов

- 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.

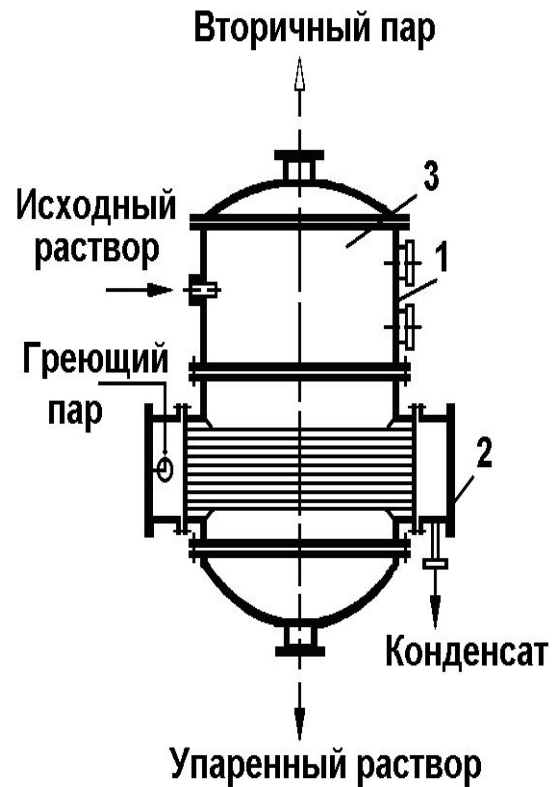
Конструкции выпарных аппаратов



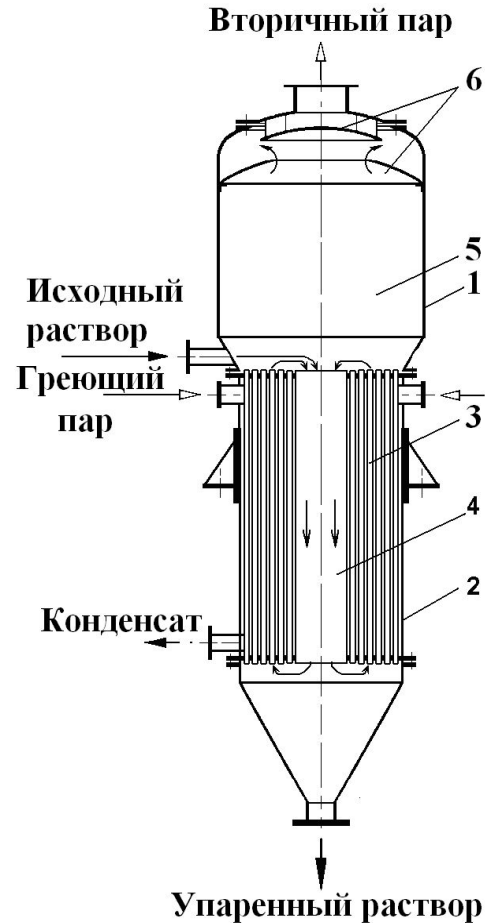
- *Выпарной аппарат с паровой рубашкой*



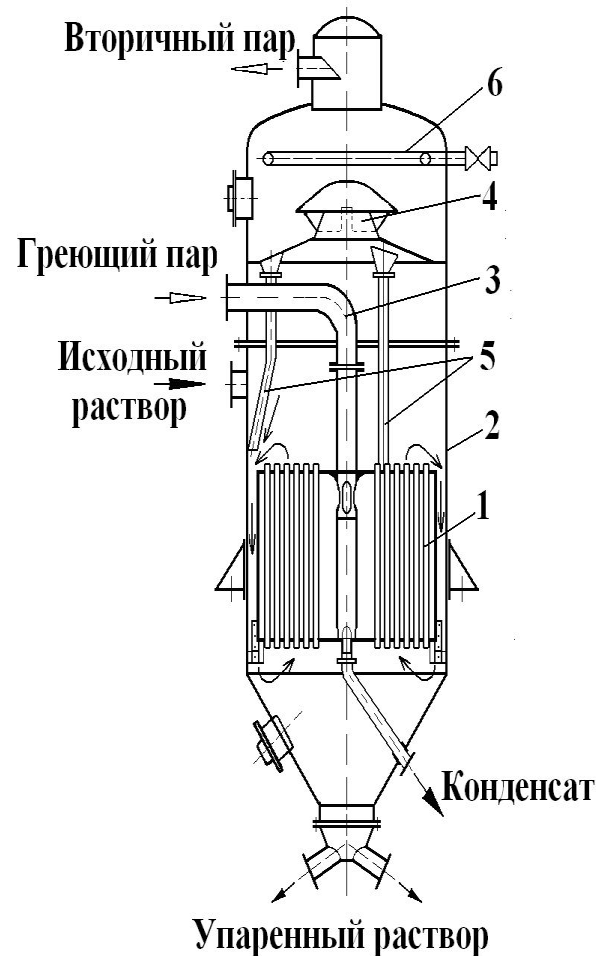
- *Змеевиковый выпарной аппарат:
1 – корпус; 2 – секции змеевика; 3 –
брызгоуловитель*



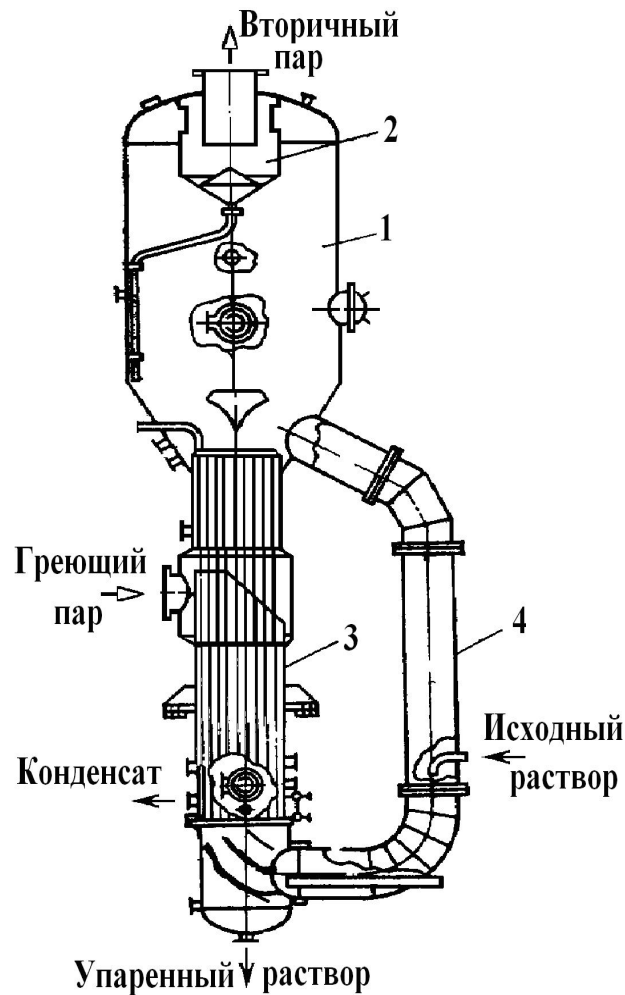
- *Выпарной аппарат с горизонтальной трубчатой греющей камерой и вертикальным цилиндрическим корпусом: 1 – корпус; 2 – трубчатая греющая камера; 3 – сепарационное пространство*



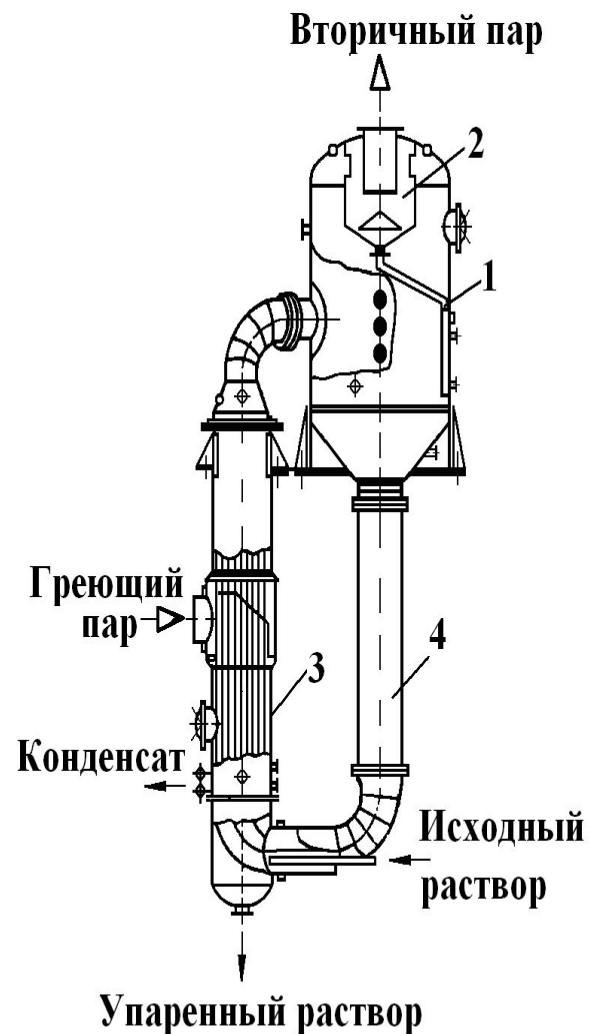
- *Выпарной аппарат с соосной греющей камерой и центральной циркуляционной трубой: 1 – корпус; 2 – греющая камера; 3 – кипяtilьные трубы; 4 – циркуляционная труба; 5 – сепаратор; 6 – брызгоуловитель*



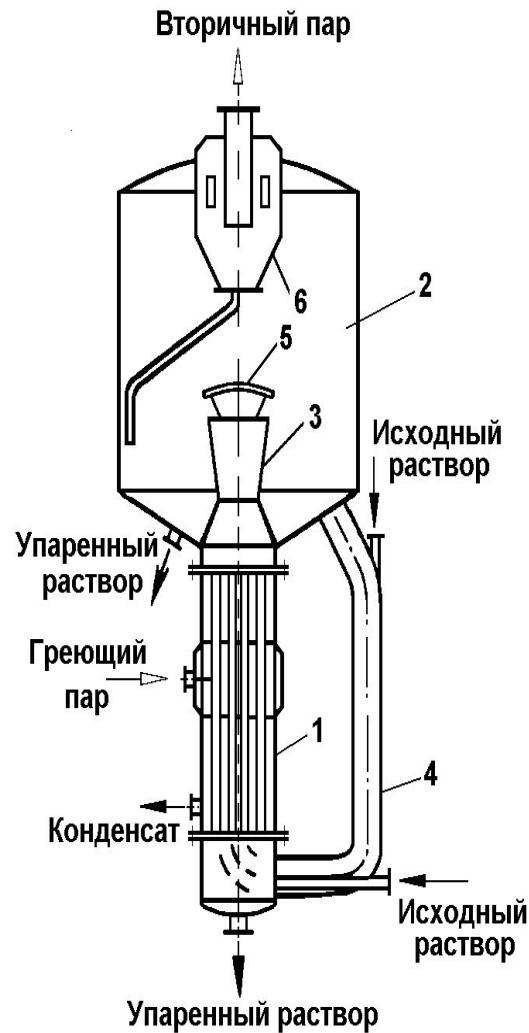
- *Выпарной аппарат с подвесной греющей камерой: 1 – греющая камера; 2 – корпус; 3 – паровая труба; 4 – брызгоуловитель; 5 – сливные трубы; 6 – перфорированная труба для промывки*



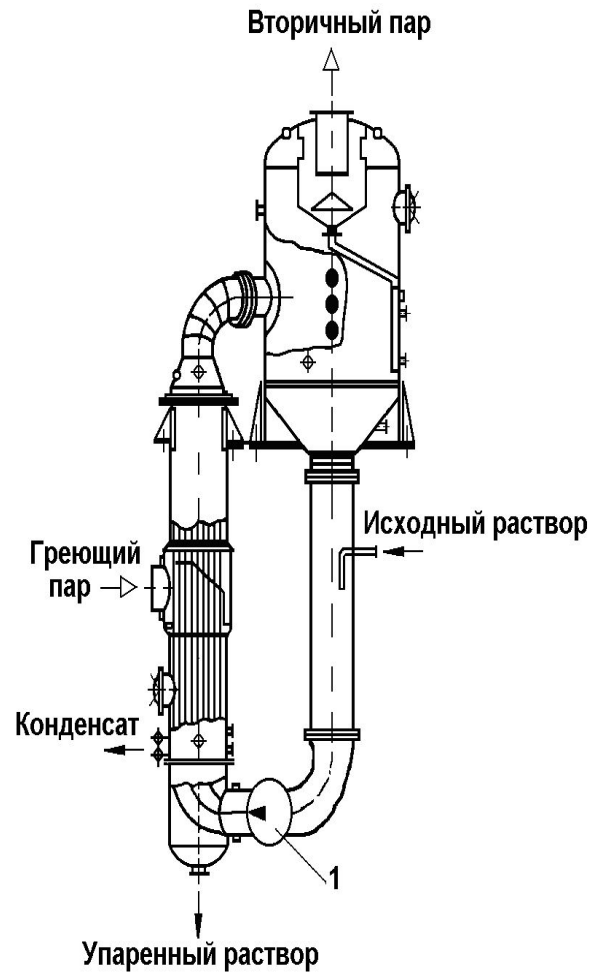
- *Выпарной аппарат с соосной греющей камерой и выносной циркуляционной трубой:
1 – сепаратор; 2 – брызгоуловитель; 3 – греющая камера; 4 – циркуля-ционная труба*



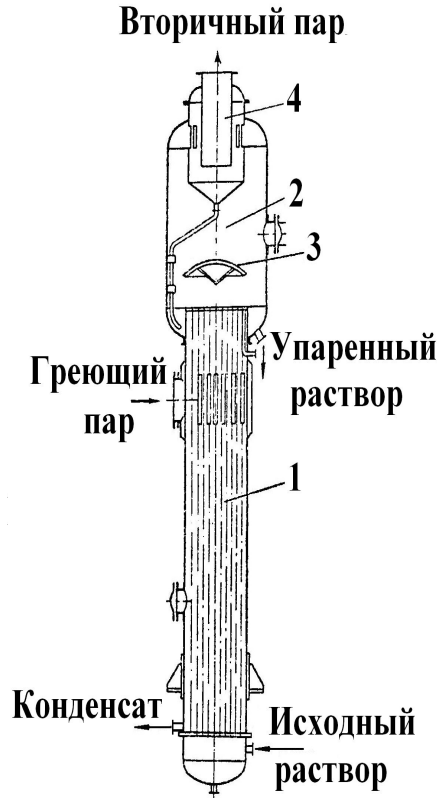
- *Выпарной аппарат с выносной греющей камерой: 1 – сепаратор; 2 – брызгоуловитель; 3 – греющая камера; 4 – циркуляционная труба*



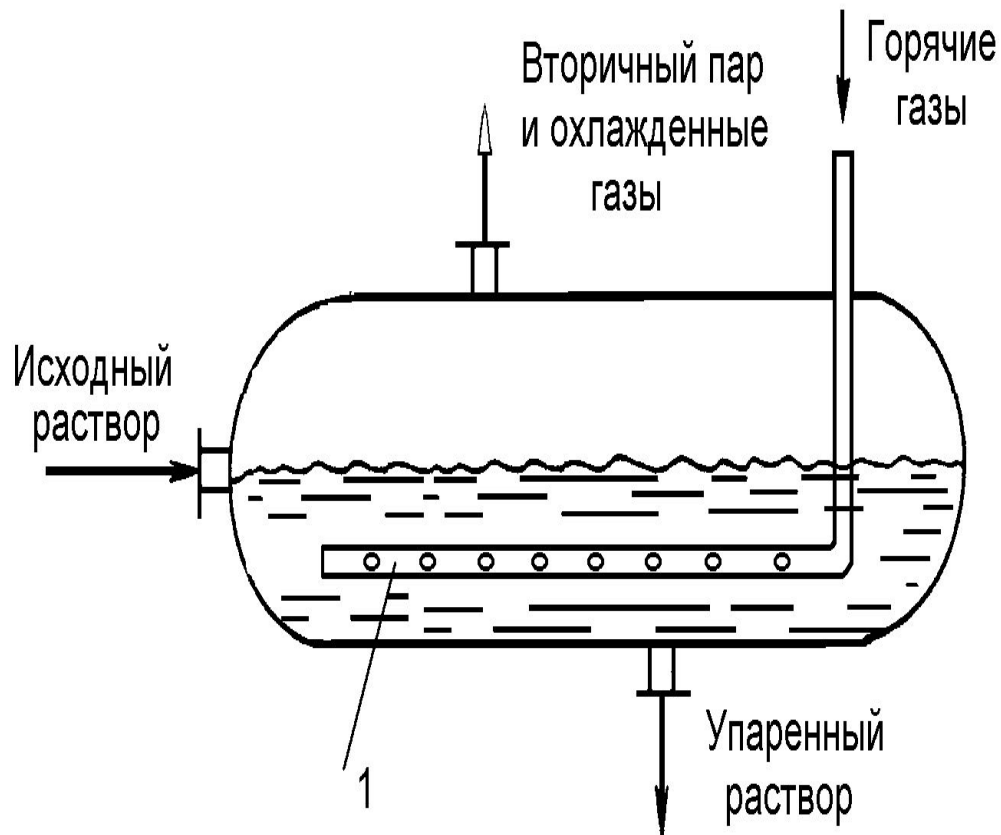
- *Выпарной аппарат с вынесенной зоной кипения: 1 – греющая камера; 2 – сепаратор; 3 – испарительная труба; 4 – циркуляционная труба; 5 – кап-леотбойник; 6 – брызгоуловитель*



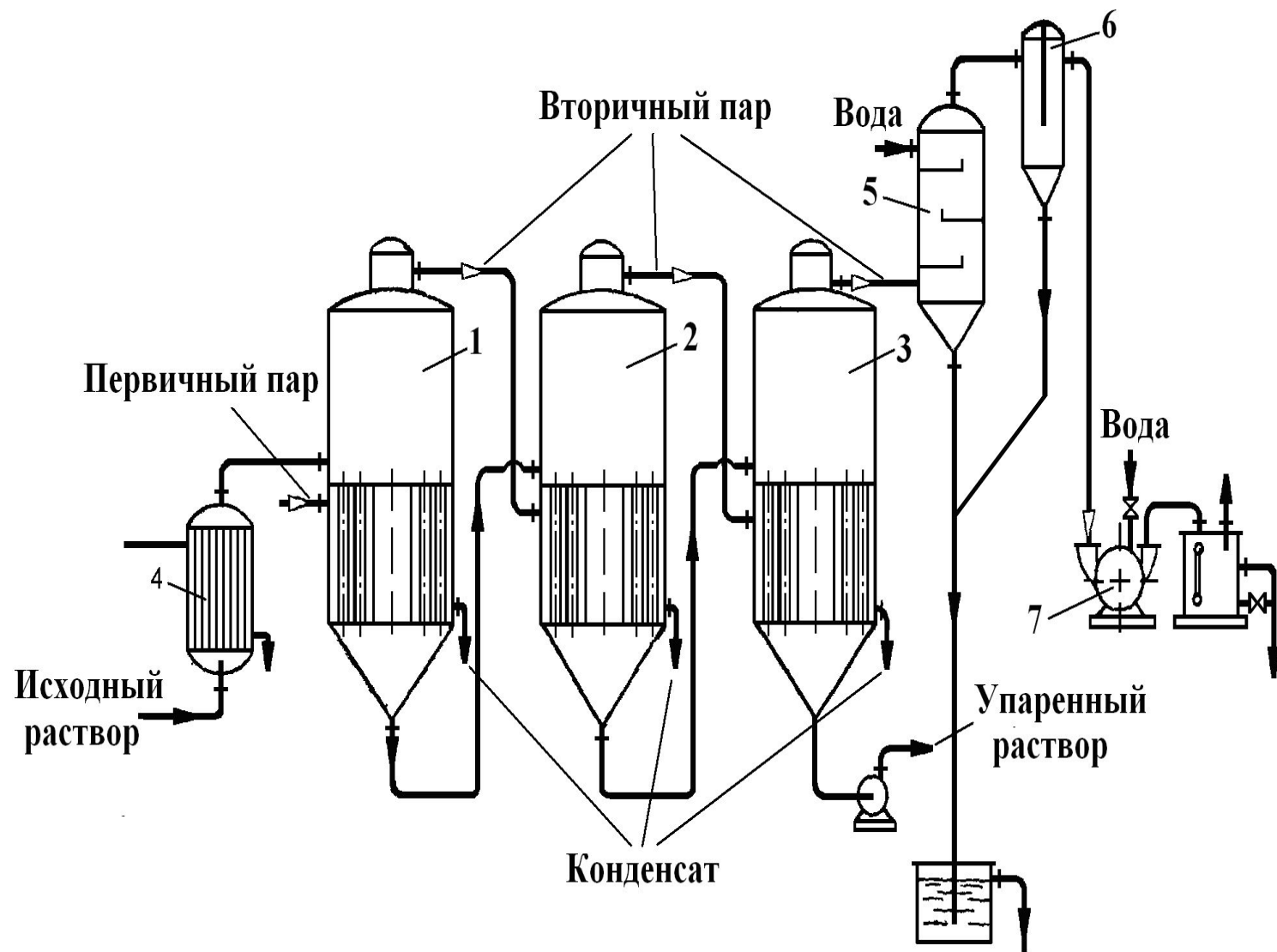
- *Выпарной аппарат с принудительной циркуляцией раствора: 1 – насос*

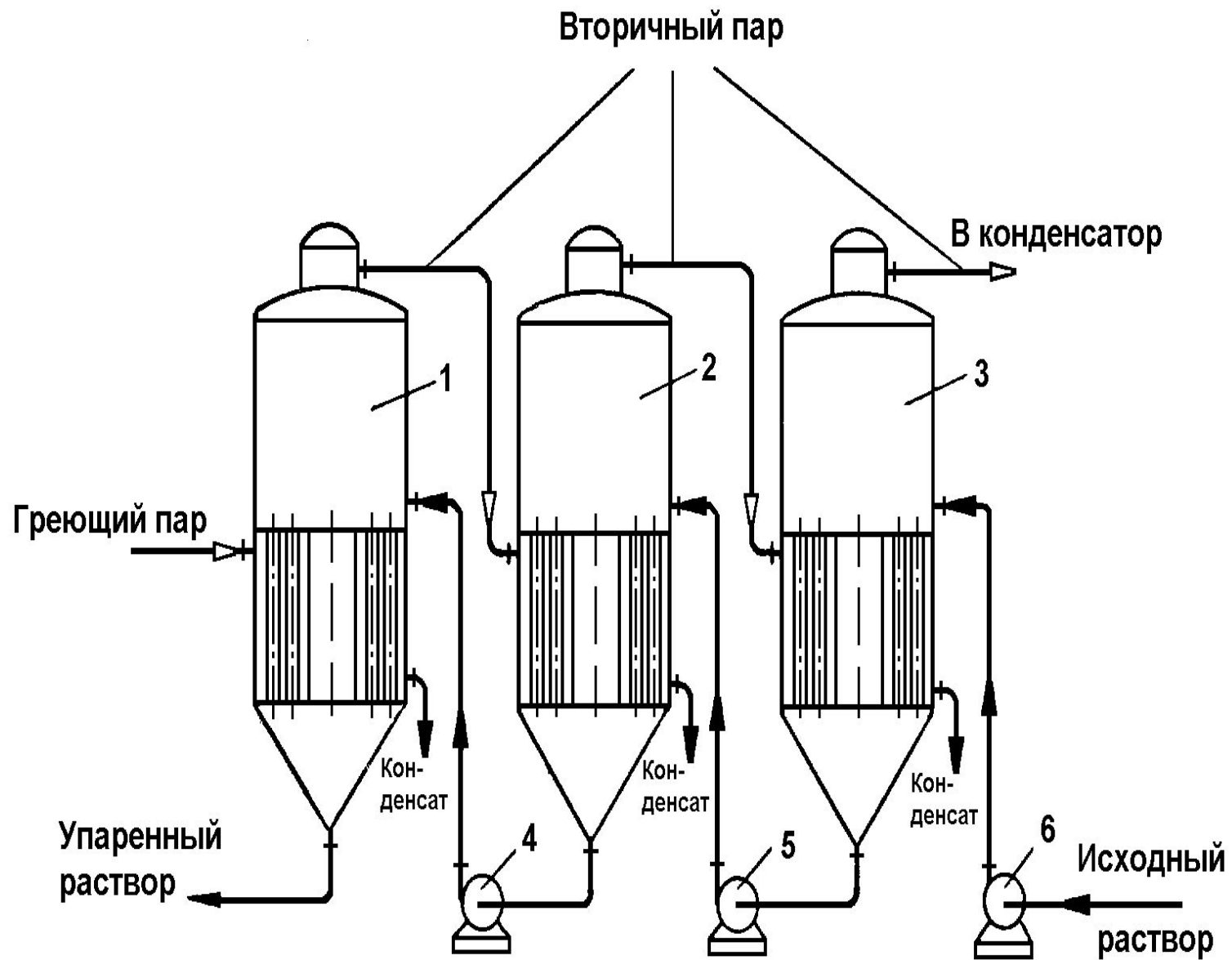


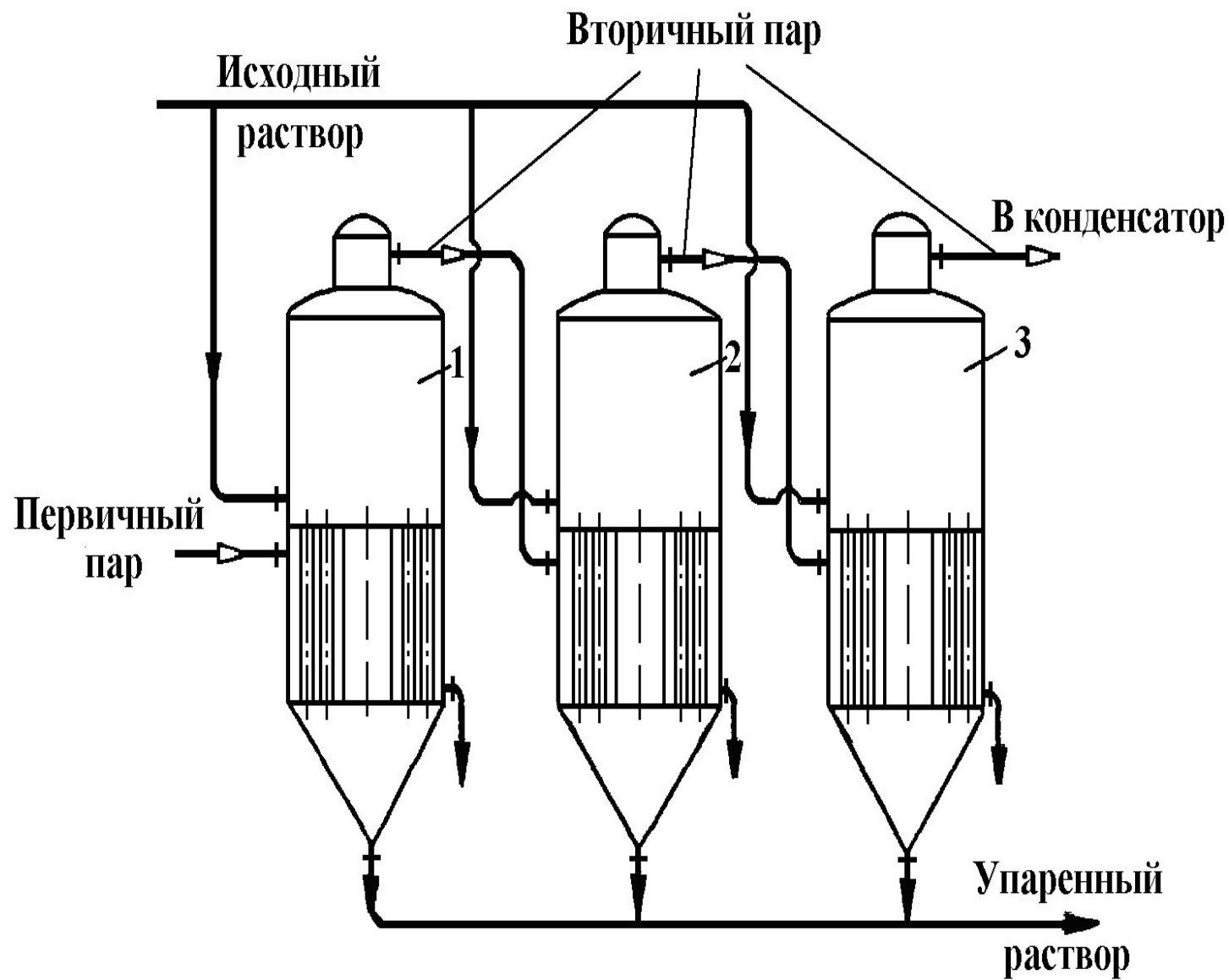
- *Вертикальный пленочный выпарной аппарат с восходящим движением пленки: 1 – греющая камера; 2 – сепаратор; 3 – брызгоотбойник; 4 – брызгоуловитель*

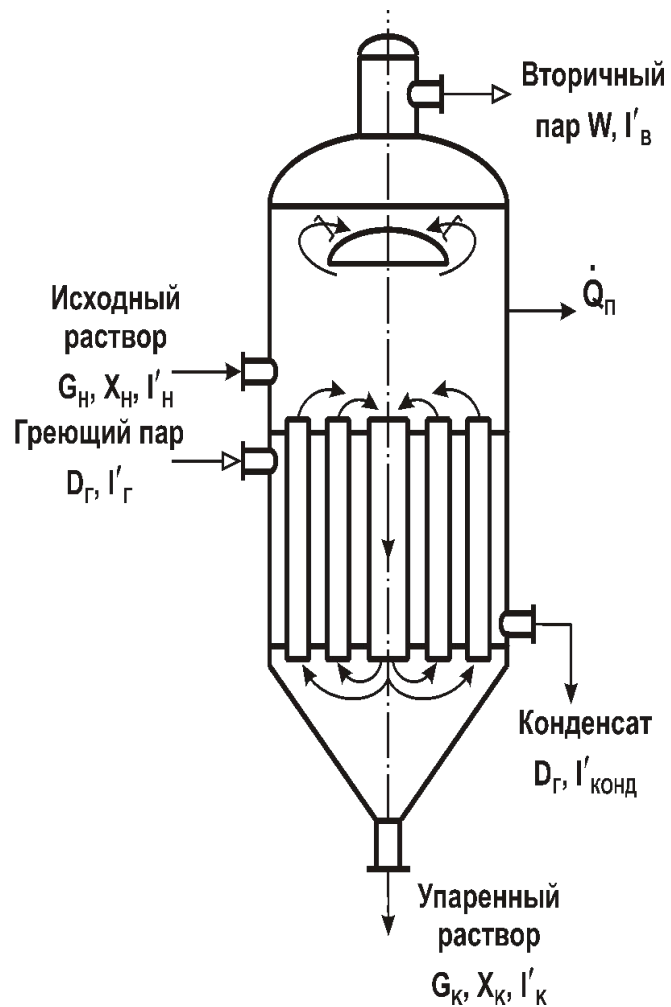


- *Барботажный выпарной аппарат: 1 – барботер*









$$G_H = G_K + W$$

$$G_H X_H = G_K X_K$$

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 $\dot{Q}_\text{н} = G_\text{н} I'_\text{н},$

с греющим паром $\dot{Q}_\text{г} = D_\text{г} I'_\text{г}.$

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

с упаренным раствором $\dot{Q}_\text{к} = G_\text{к} I'_\text{к},$

с вторичным паром $\dot{Q}_\text{в} = W I'_\text{в},$

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

с потерями в окружающую $\dot{Q}_\text{п}.$

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:

$$W = G_{\text{н}} \left(1 - \frac{X_{\text{н}}}{X_{\text{к}}} \right)$$

$$G_{\text{к}} = G \frac{X_{\text{н}}}{X_{\text{к}}}$$

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:

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

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

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

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

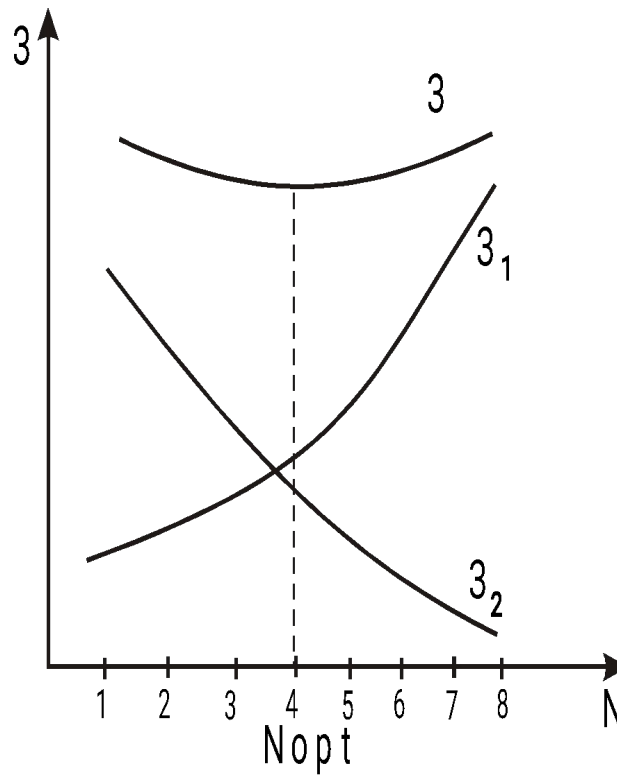
$$W = \sum_{i=1}^N W_i,$$

- 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-ze17ADPI>



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>