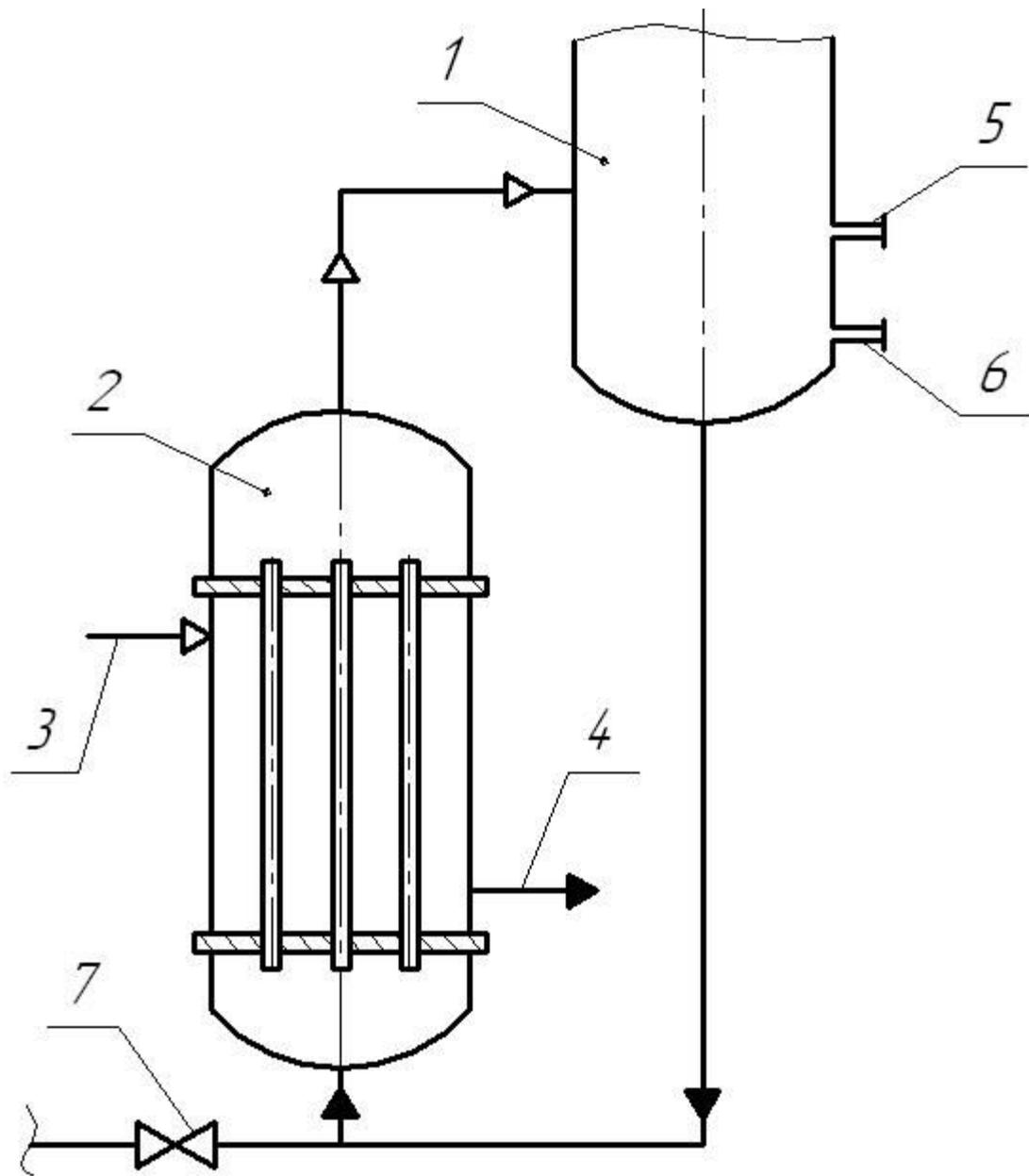


# «Теплообменное оборудование»

Задача: снижение затрат  
тепловой энергии на единицу  
продукции

В России расход тепловой  
энергии на единицу продукции  
нефтехимпереработки на 30%  
выше чем в развитых странах

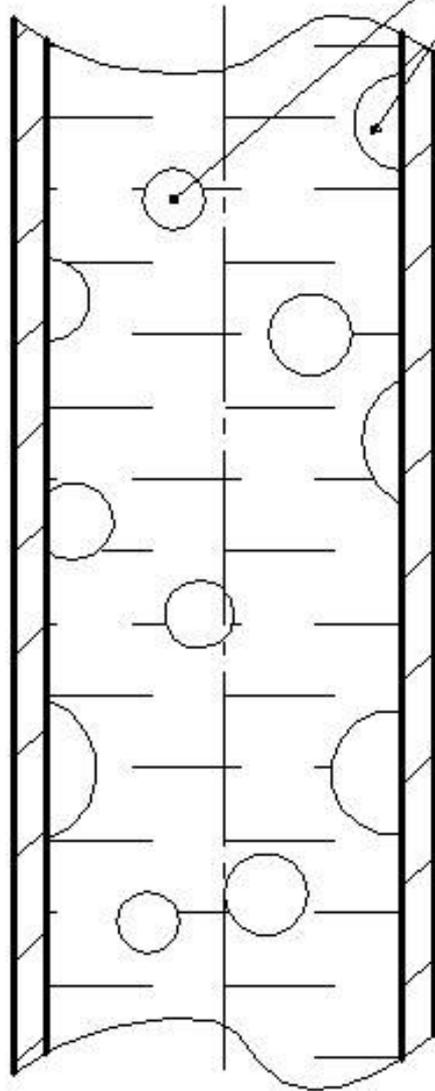




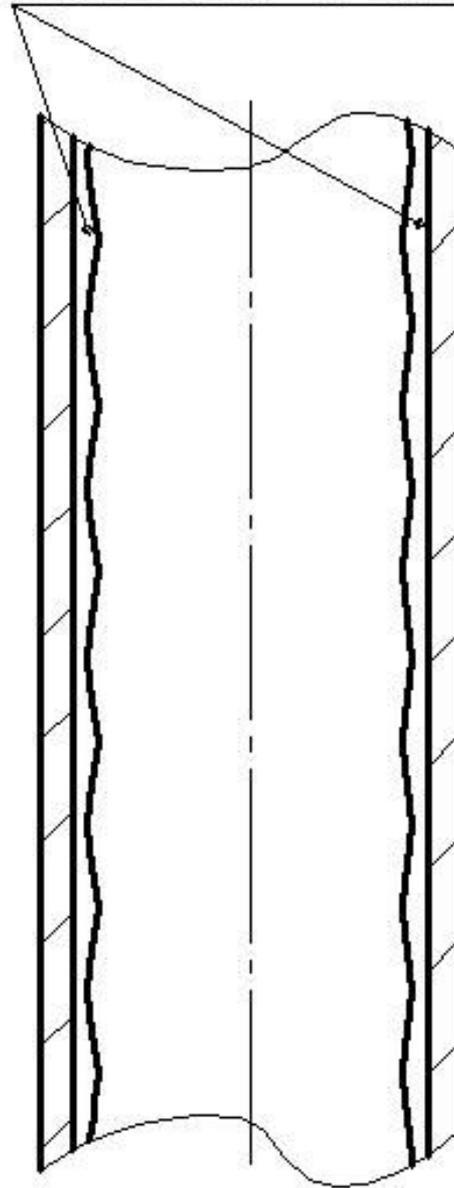
# Недостатки кожухотрубчатых кипятильников с затопленными трубами

- **Низкий коэффициент теплопередачи**
- **Образование отложений смол и кокса на теплообменной поверхности**
- **Необходимость периодической чистки**

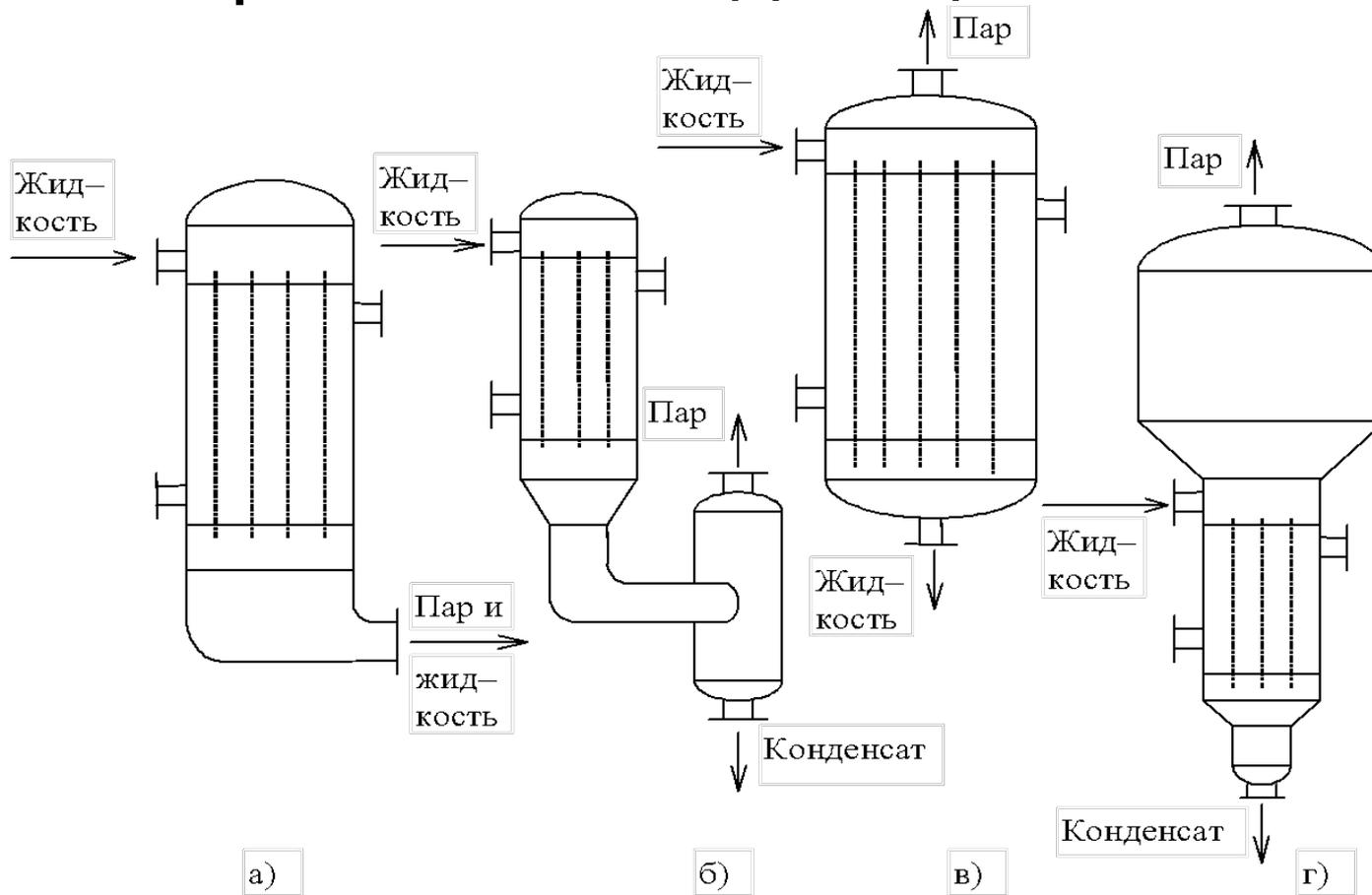
пузырьки пара



пленка жидкости

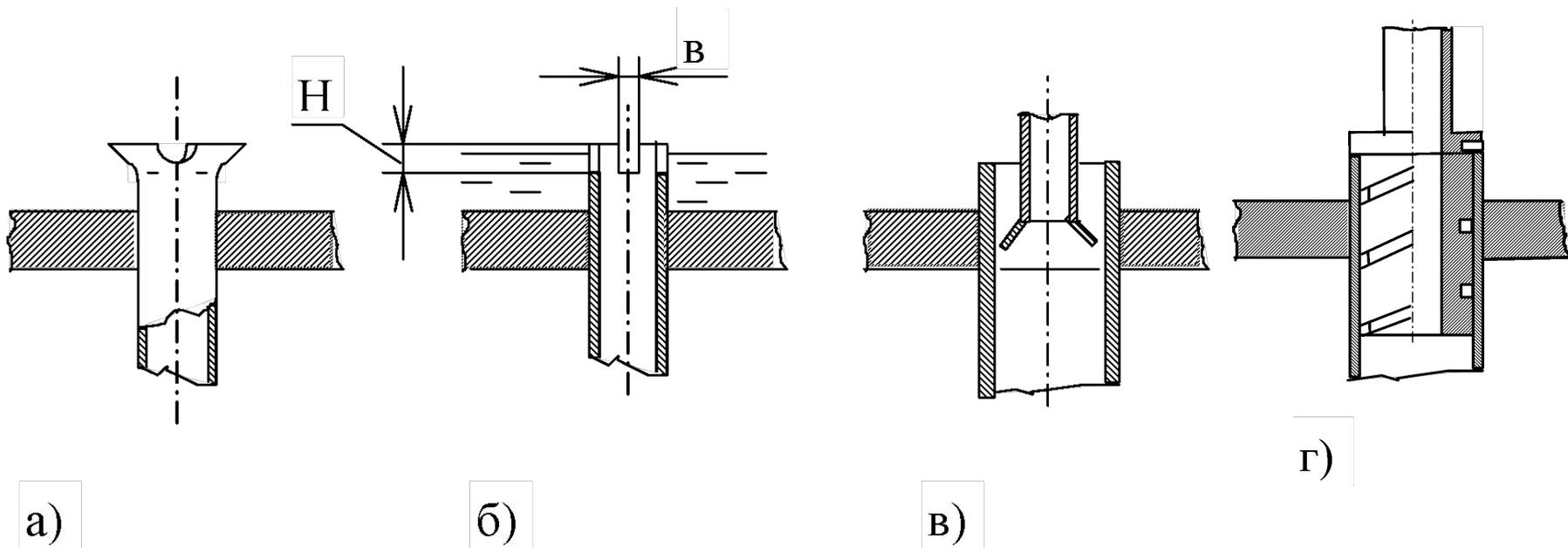


# Основные схемы пленочных испарителей с падающей пленкой

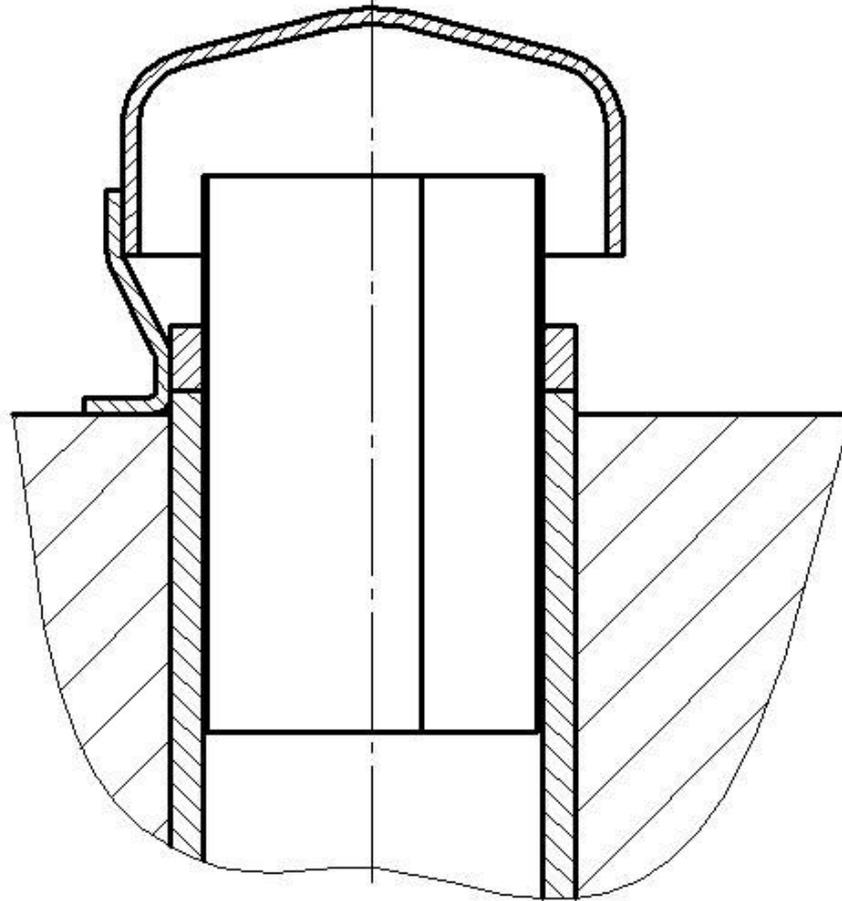


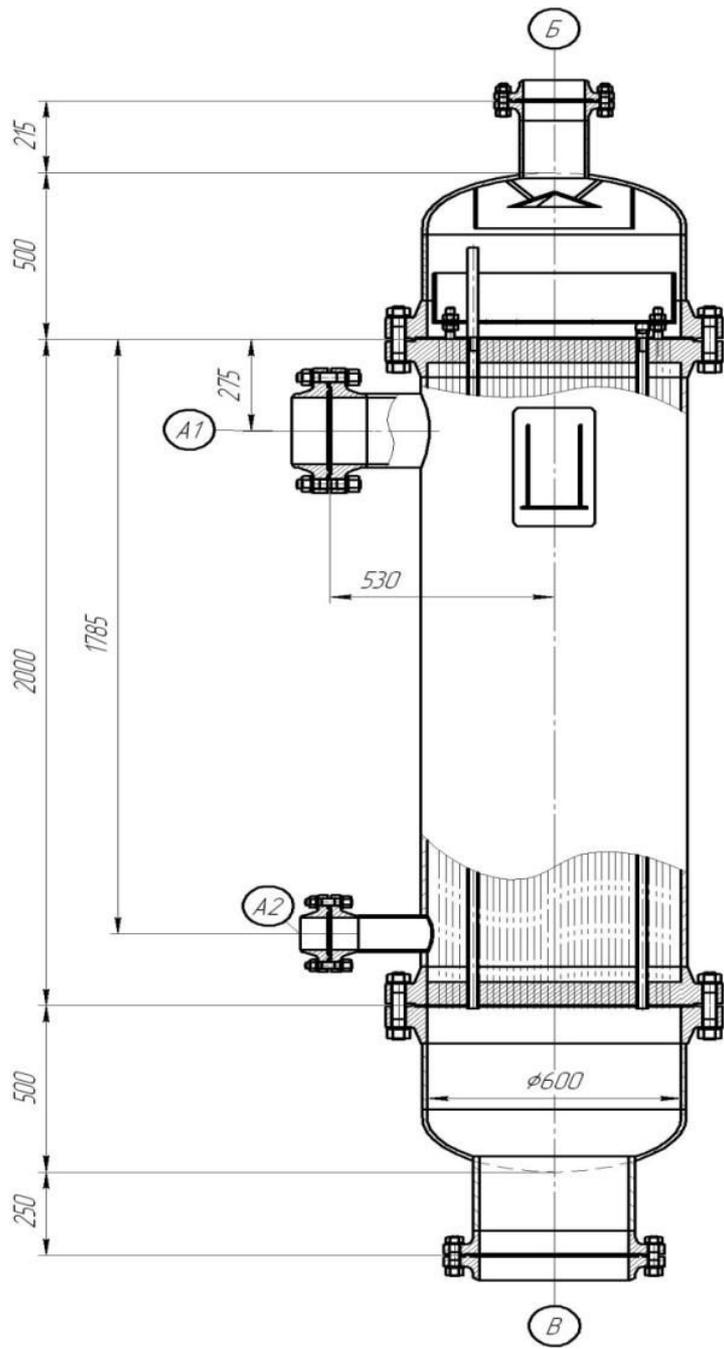
а, б - прямоточные; в, г - противоточные пленочные испарители

# Распределительные устройства пленочных испарителей



# Распределительное устройство нового типа

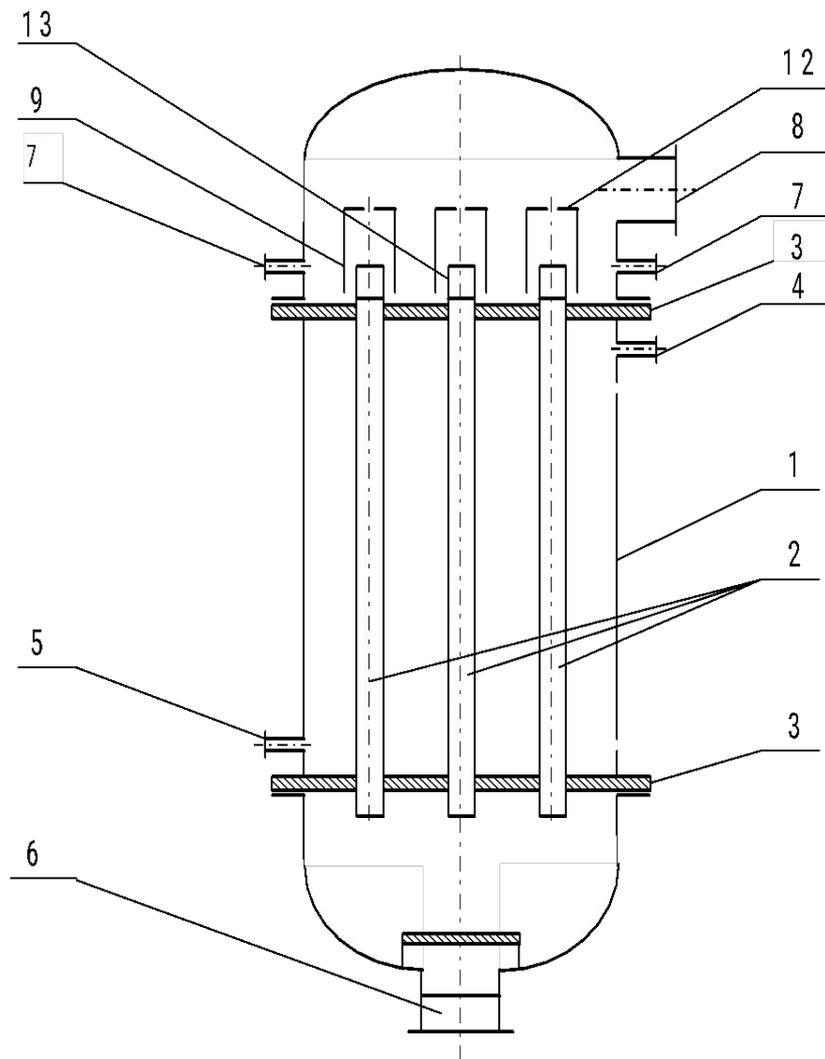




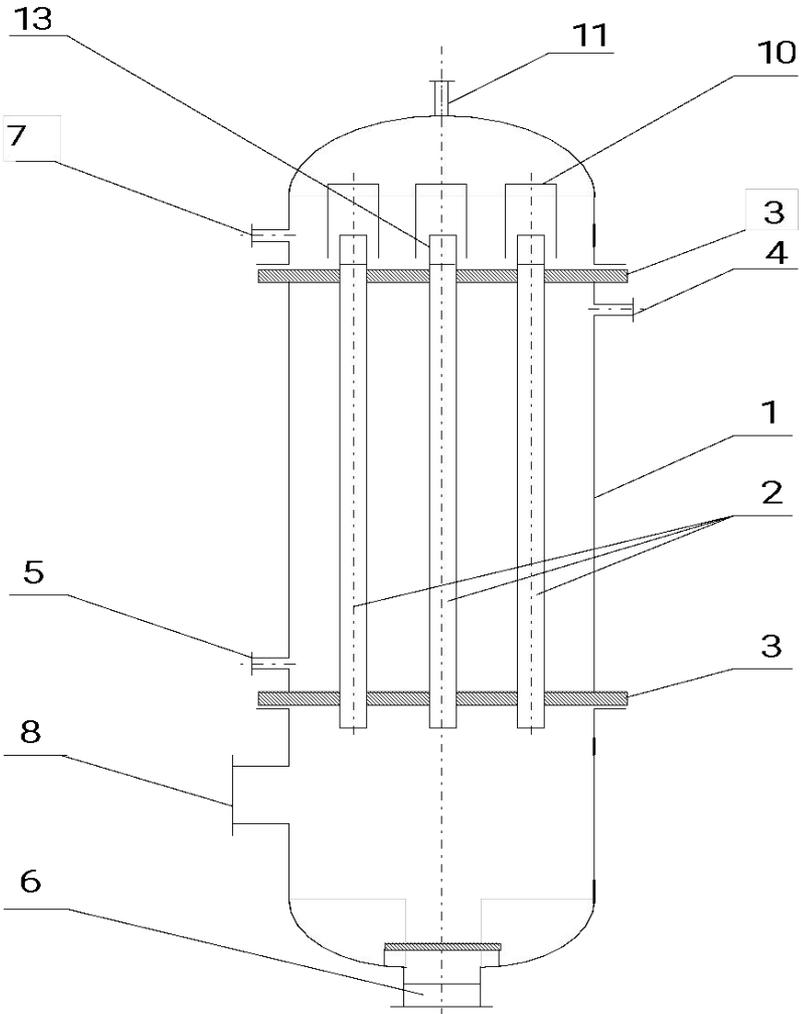
# Пленочные испарители

- Преимущества:
- Высокие коэффициенты теплопередачи 2...4 кВт/м<sup>2</sup>К
- Отсутствие отложений на греющей поверхности со стороны испаряемой жидкости
- Нет гидростатического давления столба жидкости и следовательно ниже температура испарения
- Малое время пребывания при нагреве (меньше термическая деградация и смолообразование)
- Более полное использование энергетического потенциала теплоносителей (экономии пара).

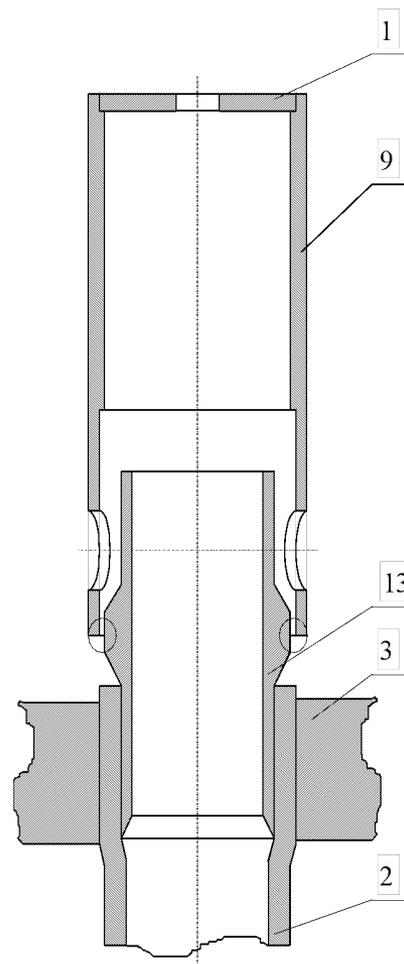
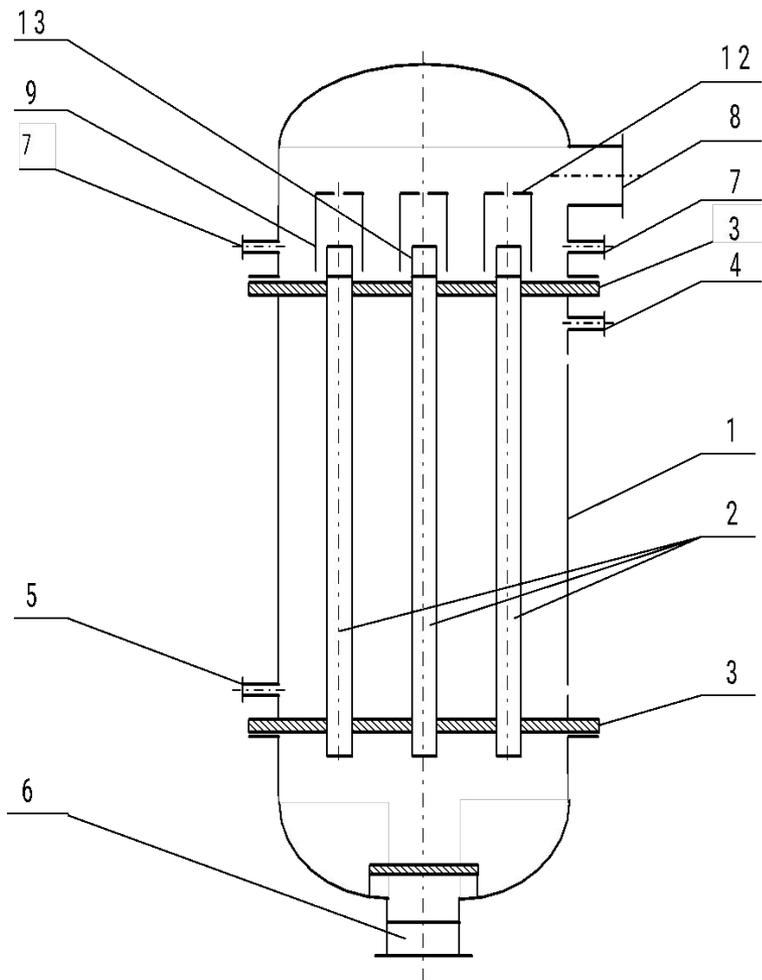
# Прямоточный пленочный испаритель



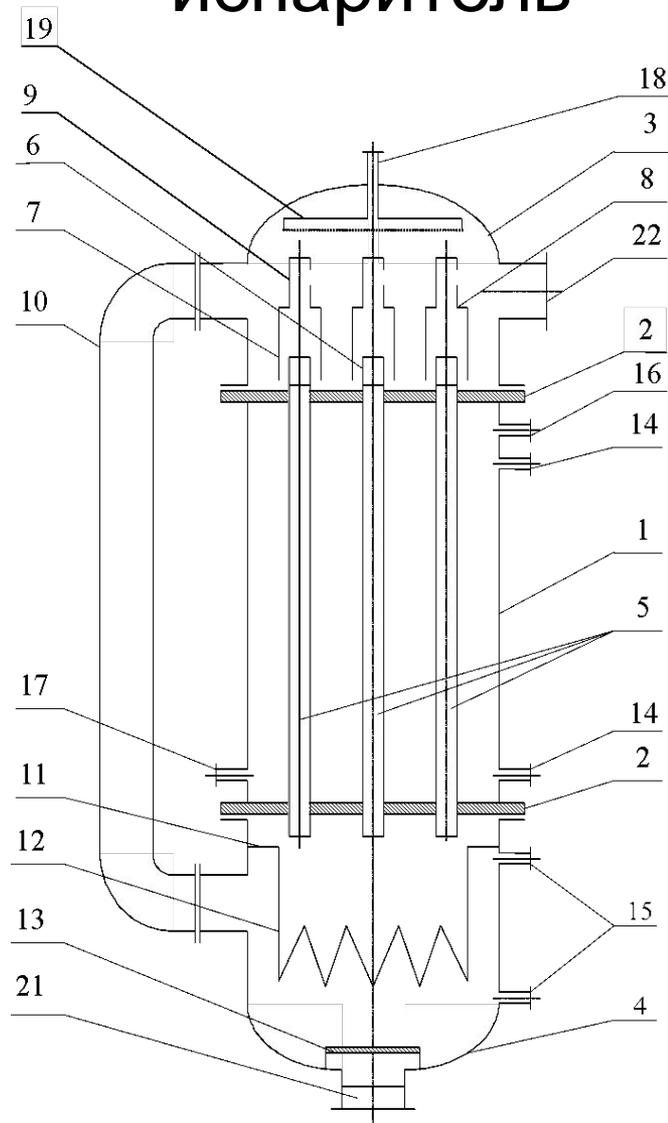
# Противоточный пленочный испаритель



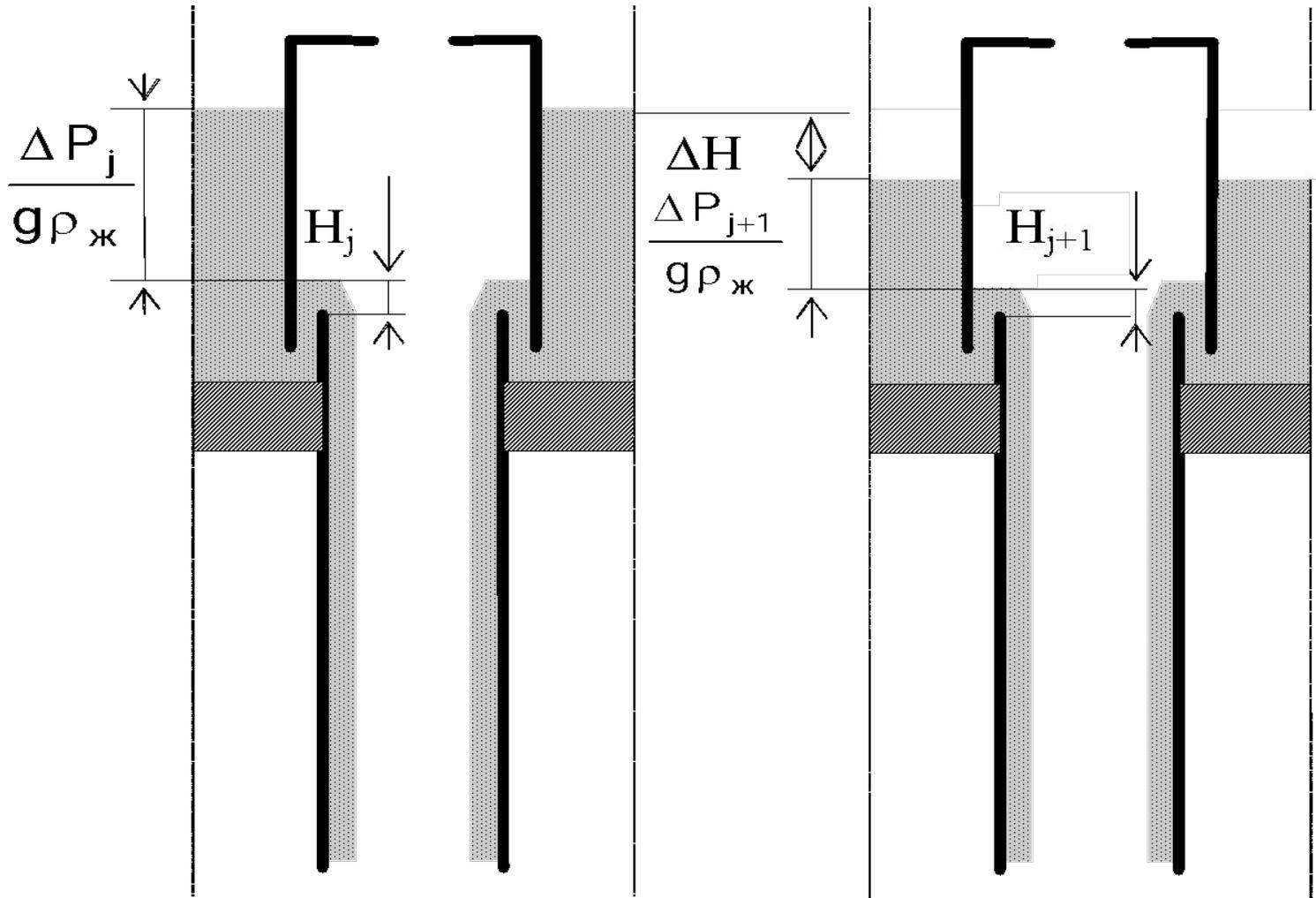
# Пленочные аппараты с распределением жидкости по трубам с отрицательной обратной связью по парообразованию



# Прямоточно противоточный пленочный испаритель



# Схема работы распределительного устройства



Сопротивление диафрагмы  $j$ -й трубы противоточного испарителя можно выразить через среднее сопротивление диафрагмы  $\Delta P_{\text{ср}}$  при среднем расходе паров через нее ( $Q_{\text{ср}} e_{\text{ср}}$ ):

$$\Delta P_j = \Delta P_{\text{ср}} \frac{Q_j^2 e_j^2 \rho_{\text{п}j}}{Q_{\text{ср}}^2 e_{\text{ср}}^2 \rho_{\text{пс}}}$$

где  $e_{\text{ср}}$ ,  $e_j$  - массовая доля отгона в средней по жидкостной нагрузке и  $j$  - й трубе.

В прямоточном испарителе расход пара меняется по длине теплообменных труб. В этих условиях сопротивление трубы можно найти как интегральное:

$$\Delta P_j = \frac{8d_B^2}{\rho_j r^2} \int_0^{l_1} \frac{\xi_j \rho_{пj} w_{отj}^2 dl}{d_B - 2\delta_j},$$

где  $l_1$  - длина теплообменной трубы, м;

$d_B$  - внутренний диаметр труб, м;

$\xi$  - коэффициент сопротивления орошаемой трубы;

$w_{от}$  - относительная скорость пара, м/с;

$r$  - теплота испарения жидкости, Дж/кг;

$\rho_k$  - плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>;

$\delta$  - толщина стекающей пленки, м.

Разность уровней жидкости на трубной решетке около наиболее и наименее нагруженной теплообменной трубы:

$$\Delta H = \frac{\Delta P_{\max} - \Delta P_{\min}}{g\rho_{\text{ж}}} + H_{\max} - H_{\min}$$

$$H_j = H_{\text{cp}} \left( \frac{Q_j}{Q_{\text{cp}}} \right)^{0,446}$$

# Тепловой процесс в пленочных испарителях с падающей пленкой

Локальные коэффициенты теплоотдачи от трубы к пленке жидкости  $\alpha_1$  рассчитываются по формуле Лабунцова . При  $Re_{ж} \geq 500$ :

$$\frac{\alpha_1}{\lambda_{ж}} \left( \frac{v_{ж}^2}{g} \right)^{1/3} = 0,023 (Re_{ж})^{0,25} Pr_{ж}^{0,5}$$

где  $Pr_{ж} = C_{ж} \rho_{ж} v_{ж} / \lambda_{ж}$  - критерий Прандтля;

$Re_{ж} = \Gamma / \mu_{ж}$  - критерий Рейнольдса;

$\lambda_{ж}$  - теплопроводность конденсата теплоносителя, Вт/(м · К);

$\rho_{ж}$  - плотность конденсата теплоносителя, кг/м<sup>3</sup>;

$v_{ж}$  - кинематическая вязкость теплоносителя, м<sup>2</sup>/с;

$C_{ж}$  – теплоемкость жидкости, Дж/кг.

При  $60 < Re_{\text{ж}} < 500$ :

$$\frac{\alpha_1}{\lambda_{\text{ж}}} \left( \frac{v_{\text{ж}}^2}{g} \right)^{1/3} = \frac{Pr_{\text{ж}} Re_{\text{ж}}^{0,2}}{5Pr + 2,9Pr^{1/3} Re_{\text{ж}}^{0,2}}$$

## Теплоноситель конденсирующийся насыщенный водяной пар

$$\alpha_2 = 1,21 \lambda_{\text{к}} \sqrt[3]{\frac{\rho_{\text{к}}^2 g r_{\text{к}}}{\mu_{\text{к}} l_1 q_{\text{т}}}}$$

где  $\lambda_{\text{к}}$  - теплопроводность конденсата теплоносителя,  
Вт/(м·К);

$\rho_{\text{к}}$  - плотность конденсата теплоносителя, кг/м<sup>3</sup>;

$r_{\text{к}}$  - теплота конденсации теплоносителя, Дж/кг;

$\mu_{\text{к}}$  - динамическая вязкость теплоносителя, Па·с;

$q_{\text{т}}$  - удельная тепловая нагрузка теплообменной трубы, Вт/м<sup>2</sup>.

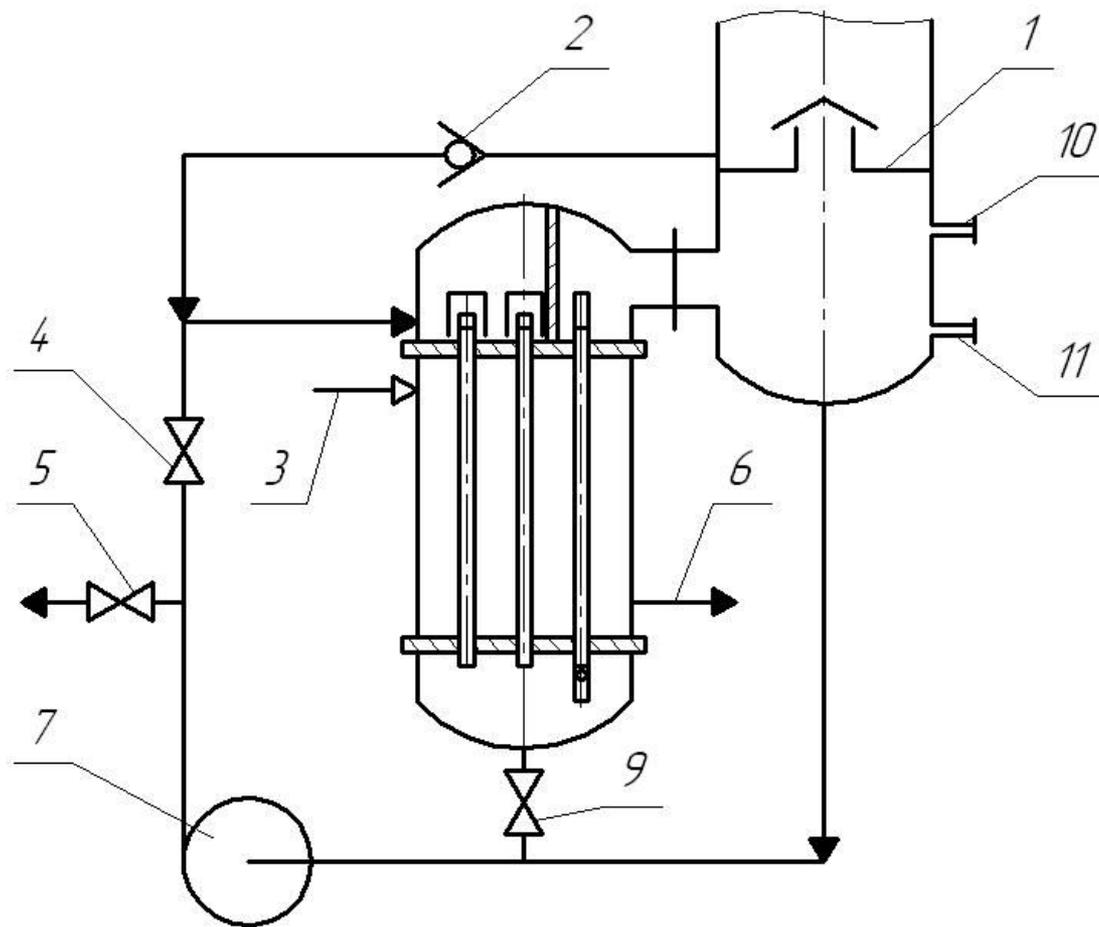
# Коэффициент теплопередачи

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} + \frac{\delta_{CT}}{\lambda_{CT}} + r_T}$$

# Недостатки пленочных испарителей

- Необходим насос для циркуляции жидкости через испаритель
- Требуются распределительные устройства на каждую теплообменную трубу

# МНОГОПОТОЧНЫЕ ПЛЕНОЧНЫХ ИСПАРИТЕЛЕЙ



# Схема включения трехпоточных пленочных испарителей

