

Прикладная химия

Теплоперенос в химических
реакторах и теплообменники

Температурные режимы

Температура оказывает существенное влияние на скорость химического процесса и другие показатели его эффективности. При проведении реакций разного типа требуется различный *температурный режим*. Под температурным режимом реактора понимают поддержание в нем необходимой и оптимальной для данного процесса температуры.

В промышленной практике используют два типа температурного режима:

- режим постоянных температур
- режим переменных температур.

Выбор режима определяется, в основном, технологическим классом реакции.

Температурные режимы

Допустим, в реакторе протекает простая реакция:

Если она эндотермическая (протекает с поглощением тепла) или слабо экзотермическая то тогда используется режим постоянной температуры, которая максимальна из оптимального диапазона.

Если реакция сильно экзотермическая, то тогда приходится использовать режим переменных температур: температура в реакторе по мере протекания реакции должна понижаться, для компенсации теплового эффекта реакции.

Причины изменения температуры химического реактора

Температура в реакторе может изменяться по двум причинам:

- за счет протекания химической реакции (если реакция экзотермическая, температура повышается, если эндотермическая – понижается);
- за счет теплообмена с окружающей средой, то есть температура в реакторе зависит от теплового режима реактора.

Учет всех тепловых явлений осуществляется при составлении теплового баланса реактора, уравнение которого, наряду с уравнением материального баланса, является основой для расчета реакторов.

Уравнение теплового баланса реактора

В общем виде уравнение теплового баланса записывается

$$Q_{\text{приход}} = Q_{\text{расход}}$$

где $Q_{\text{приход}}$ – количество тепла, поступающего в реактор в единицу времени, $Q_{\text{расход}}$ – количество тепла, расходуемого в реакторе в единицу времени.

Тепло приходит в реактор с реагентами $Q_{\text{реаг.}}$ и выделяется (или поглощается) в результате химической реакции $Q_{\text{хим.р.}}$

$$Q_{\text{приход}} = Q_{\text{реаг.}} \pm Q_{\text{хим.р.}}$$

Уравнение теплового баланса реактора

Расход тепла происходит в результате уноса тепла с продуктами $Q_{\text{прод.}}$, теплообмена с окружающей средой $Q_{\text{т/об.}}$; часть тепла накапливается в реакторе $Q_{\text{накоп.}}$.

$$Q_{\text{расход}} = Q_{\text{прод.}} \pm Q_{\text{т/об.}} + Q_{\text{накоп.}}$$

После объединения двух частей получаем:

$$Q_{\text{реак.}} \pm Q_{\text{хим.р.}} = Q_{\text{прод.}} \pm Q_{\text{т/об.}} + Q_{\text{накоп.}}$$

Обозначим $Q_{\text{прод.}} - Q_{\text{реак.}} = Q_{\text{конв.}}$ – конвективный перенос тепла. Тогда после преобразований получим:

$$Q_{\text{накоп.}} = -Q_{\text{конв.}} \pm Q_{\text{т/об.}} \pm Q_{\text{хим.р.}}$$

Это - уравнение теплового баланса реактора в общем виде.

Уравнение теплового баланса реактора

Если температура неодинакова в разных точках объема реактора или во времени, используют дифференциальную форму уравнения теплового баланса, выведенную для некоторого элементарного объема $dx \, dy \, dz$.

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial \tau} = -\rho C_p (W_x \frac{\partial T}{\partial x} + W_y \frac{\partial T}{\partial y} + W_z \frac{\partial T}{\partial z}) + \lambda (\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}) - F_{уд.} K \Delta T + r_A \Delta H$$

где ρ – плотность реакционной смеси; C_p – удельная теплоемкость реакционной смеси; x, y, z – пространственные координаты, W_x, W_y, W_z – составляющие скорости движения потока в направлении осей x, y, z ; λ – коэффициент молекулярной и турбулентной теплопроводности реакционной смеси; $F_{уд.}$ – удельная поверхность теплообмена; K – коэффициент теплопередачи; $\Delta T = T - T_{T/нос.}$ (T – температура реакционной смеси, $T_{T/нос.}$ – температура теплоносителя); r_A – скорость химической реакции; ΔH – тепловой эффект реакции.

Устойчивость режима работы реактора

Ни один реактор не работает в строго стационарном режиме. Небольшие колебания состава исходных реагентов, температуры, давления, скорости потоков и другие возмущения могут вывести процесс из стационарного состояния.

Химико-технологический процесс протекает нормально только в том случае, если малые внешние воздействия ведут к малым отклонениям от режима процесса и после снятия произведенного возмущения система может возвратиться к прежнему состоянию. Такая система называется *устойчивой*.

В *неустойчивой* системе отклонение, вызванное случайным возмущением на входе в реактор, увеличивается во времени; режим после снятия возмущения не возвращается в исходное стационарное состояние.

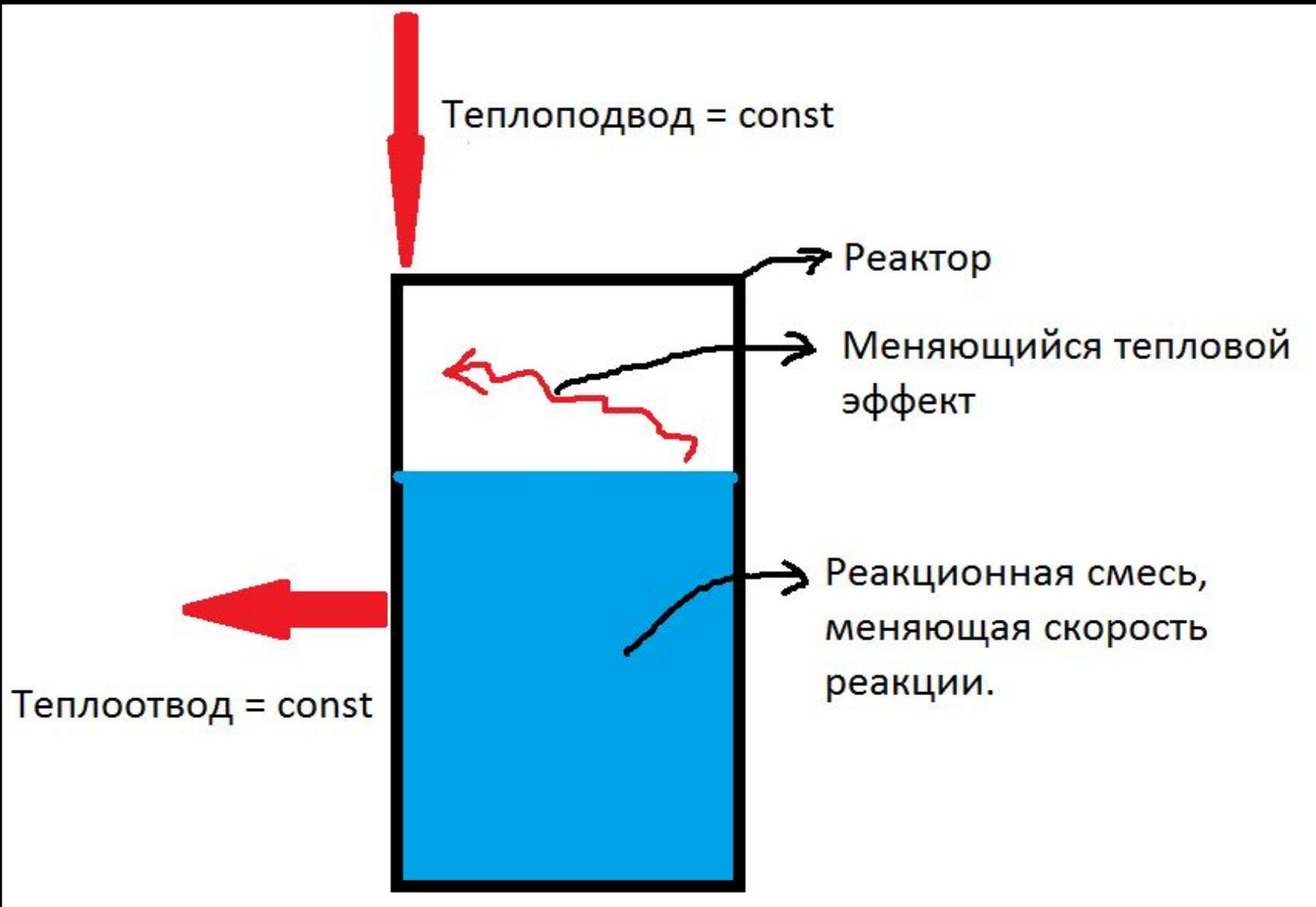
Причина неустойчивости температурного режима

Единственной причиной неустойчивости химических процессов является *температурная неустойчивость, то есть самоускорение или самозамедление реакции под воздействием изменения собственного теплового эффекта.* Причина заключается в различной зависимости скорости тепловыделения и скорости теплоотвода.

Причина неустойчивости температурного режима

При любом изменении технологического параметра происходит *изменение скорости химической реакции*, а **значит, меняется скорость выделения или поглощения тепла.**

Скорость же теплоотвода или теплоподвода остается постоянной.



Причина неустойчивости температурного режима

Нарушается баланс между приходом и расходом тепла в реакторе (тепловой баланс).

Следствием этого является нарушение стационарности процесса в проточном реакторе.

Если произведенное нарушение режима приводит к увеличению разницы между приходом и расходом тепла, система уже не может вернуться в исходное стационарное состояние (*неустойчивая система*).

Условия стационарности находят при совместном решении уравнений материального и теплового балансов.

Теплообменные аппараты

Теплообменный аппарат (теплообменник) — техническое устройство, в котором осуществляется теплообмен между двумя средами, имеющими различные температуры.

В зависимости от способа передачи тепла различают две основные группы теплообменников:

- Поверхностные теплообменники, в которых перенос тепла между обменивающимися теплом средами происходит через разделяющую их поверхность теплообмена — глухую стенку;*
- Теплообменники смешения, в которых тепло передается от одной среды к другой при их непосредственном соприкосновении.*

Конструкции поверхностных теплообменников

Поверхностные теплообменники наиболее распространены, и их конструкции весьма разнообразны. Рассмотрим типовые конструкции поверхностных теплообменников:

- *Трубчатые*
- *Змеевиковые*
- *Пластинчатые*
- *Теплообменники реакторов*
- *Блочные*
- *Шнековые*

Трубчатые теплообменники

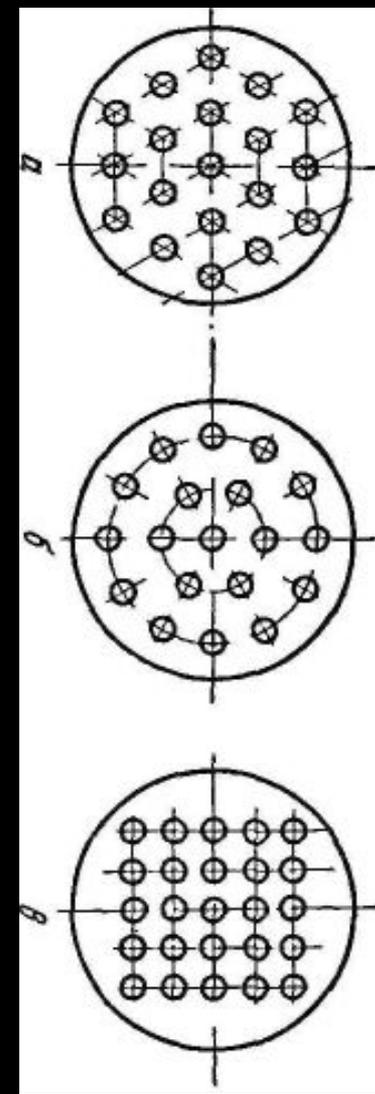
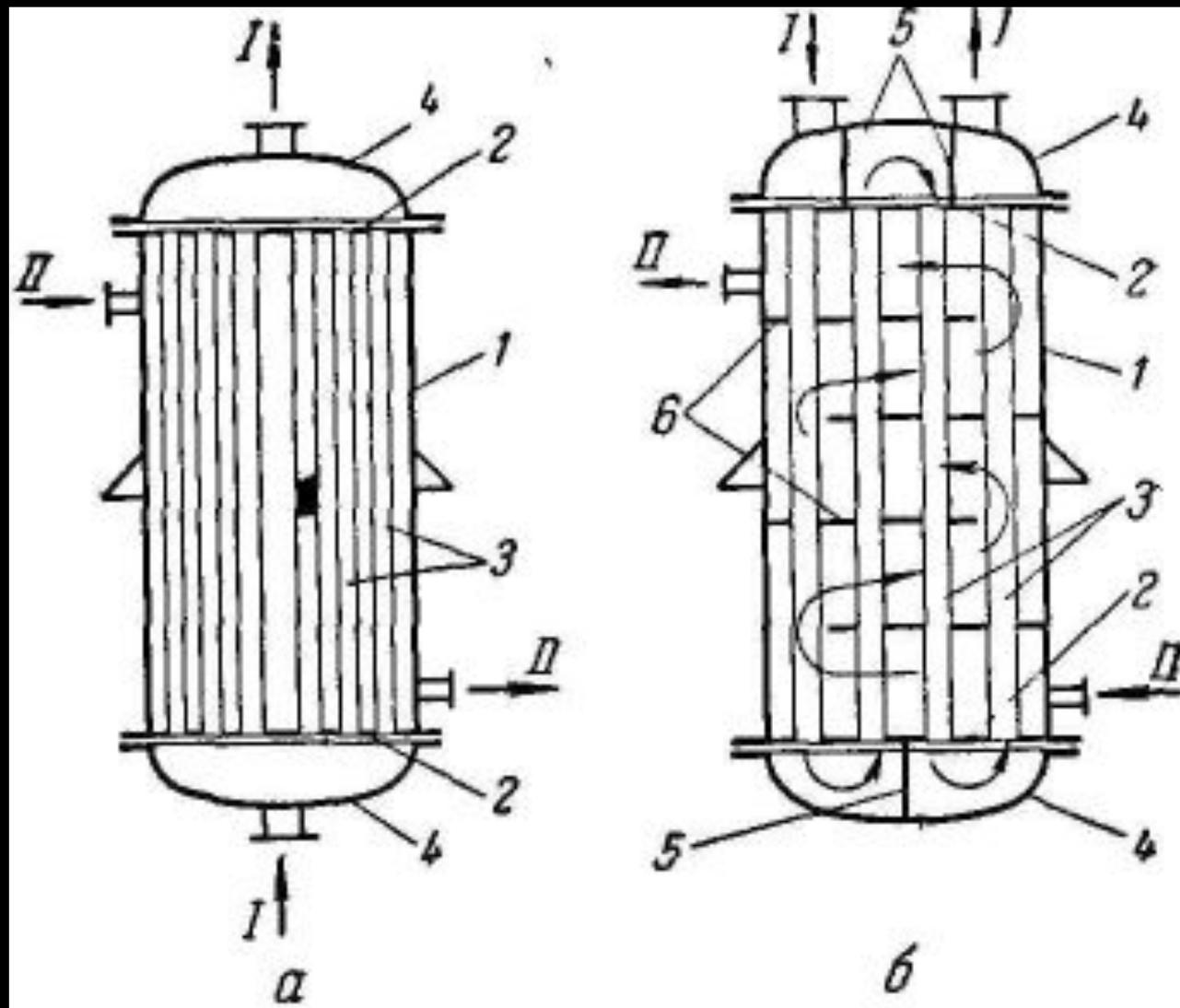
Трубчатые теплообменники состоят из кожуха(2) и проходящих внутри него труб (3). Через такой теплообменник протекает две жидкости:

- одна протекает по трубам (I),
- другая в пространстве между кожухом и трубами (II).

Горячая жидкость нагревает стенку трубы, которая отдает полученное тепло горячей жидкости.

Обычно эти жидкости направляют противотоком друг к другу. При этом нагреваемую среду направляют снизу вверх, а среду, отдающую тепло, — сверху вниз. Такое направление движения каждой среды совпадает с направлением, в котором стремится двигаться данная среда под влиянием изменения ее плотности при нагревании или охлаждении.

Схема кожухотрубчатого теплообменника



Трубчатые теплообменники

Обычный трубчатый теплообменник обладает невысокой эффективностью если жидкости протекают через него с низкой скоростью.

Для увеличения степени теплообмена жидкость в пакете труб можно заставить пройти через теплообменник несколько раз, применяя поперечные перегородки (5) в крышках теплообменника.

Этой же цели служат сегментные перегородки (6), которые разбивают пространство кожуха на несколько ходов.

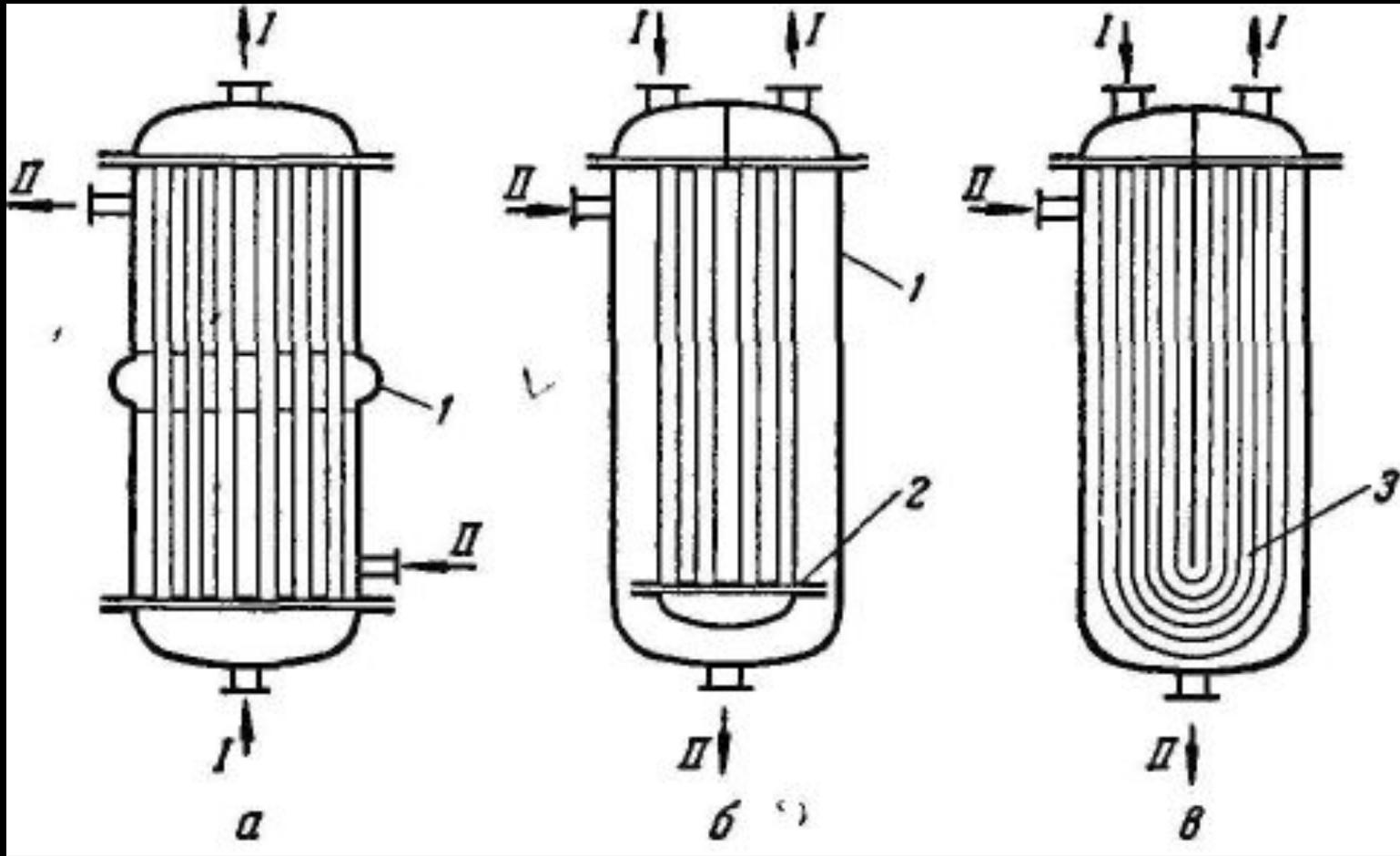
Трубчатые теплообменники

При работе теплообменника может возникать значительная разность в температур его частей, что приводит к неравномерному расширению и разрушению теплообменника. Если есть необходимость скомпенсировать неравномерное расширение компонентов теплообменника, то используются следующие решения:

- Компенсирующая линза на кожухе (рис. а, 1)
- Плавающая головка (рис. б, 2)
- U-образный пакет труб (рис. в. 3)

Основное преимущество таких теплообменников – компактность при высокой эффективности теплообмена.

Компенсаторы расширения



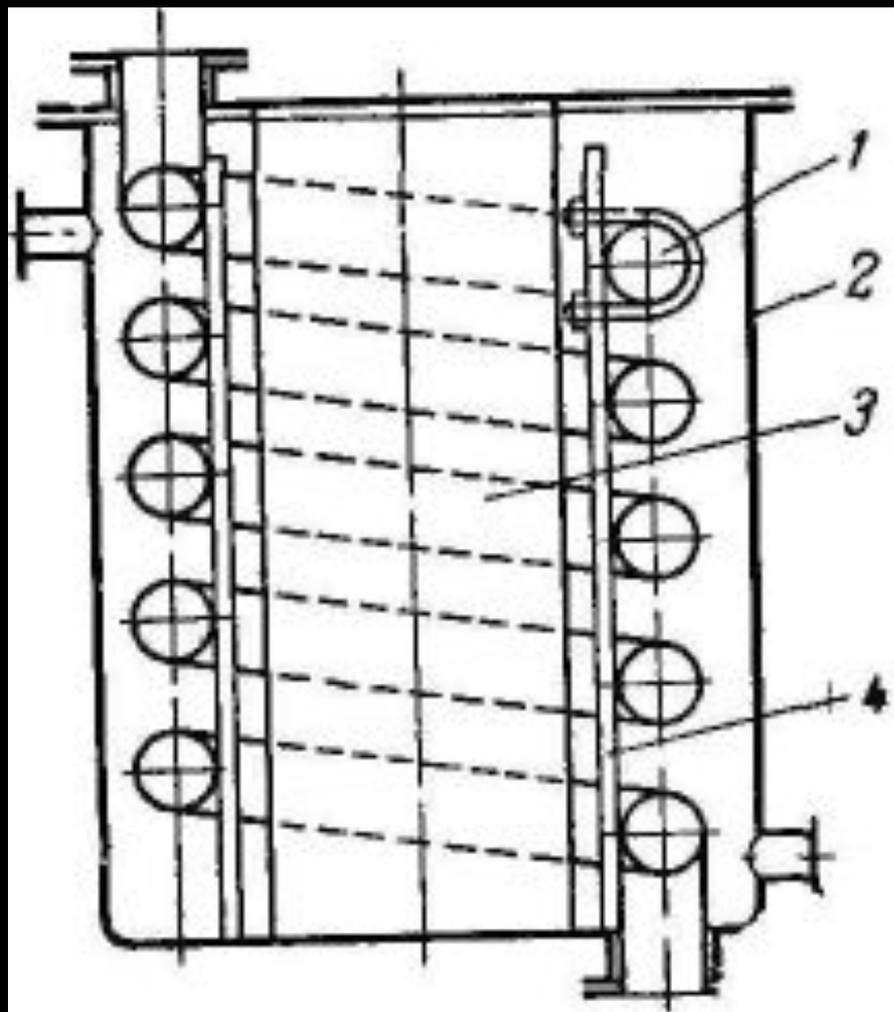
Змеевиковые теплообменники

В погружном змеевиковом теплообменнике капельная жидкость, газ или пар движутся по спиральному змеевику 1, который погружен в жидкость, находящуюся в корпусе 2 аппарата.

Вследствие большого объема корпуса, в котором находится змеевик, скорость жидкости в корпусе незначительна, что обуславливает низкие значения коэффициента теплоотдачи снаружи змеевика.

Для его увеличения повышают скорость жидкости в корпусе путем установки в нем внутреннего стакана 3, но при этом значительно уменьшается полезно используемый объем корпуса аппарата.

Змеевиковый теплообменник



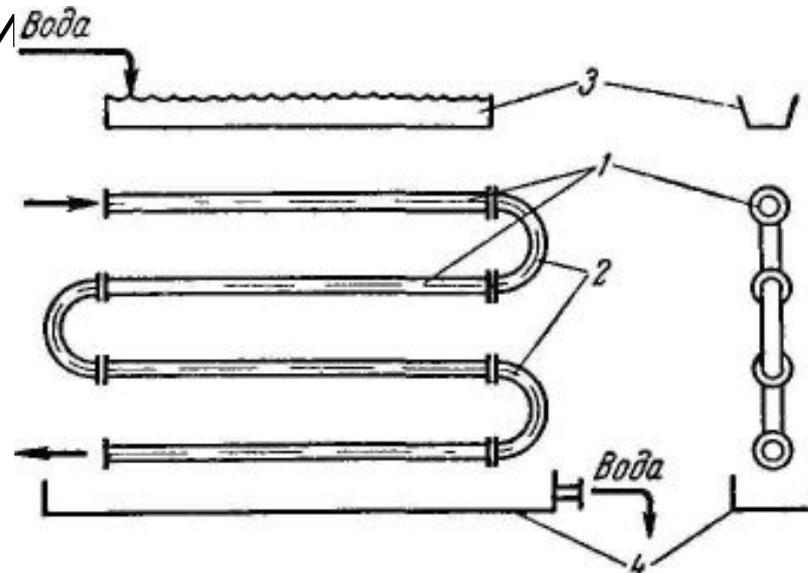
Преимущества змеевикового теплообменника

В некоторых случаях большой объем жидкости, заполняющей корпус, имеет положительное значение, так как обеспечивает более устойчивую работу теплообменника при колебаниях режима.

Погружные теплообменники находят довольно широкое применение вследствие простоты устройства, дешевизны, доступности для очистки и ремонта, а также удобства работы при высоких давлениях и в химически активных средах.

Оросительные теплообменники

Оросительные теплообменники – это змеевики (1 и 2), по которым протекает охлаждаемая жидкость. Сверху змеевики орошаются водой, равномерно распределяемой в виде капель и струек, при помощи желоба 3 с зубчатыми краями. Отработанная вода отводится из поддона 4, установленного под змеевиками



Преимущества и недостатки оросительных теплообменников

Оросительные теплообменники применяются главным образом в качестве холодильников и конденсаторов, причем около половины тепла отводится при испарении охлаждающей воды. *В результате расход воды резко снижается по сравнению с ее расходом в холодильниках других типов.*

Помимо этого, оросительные теплообменники отличаются также простотой конструкции и легкостью очистки наружной поверхности труб.

Недостатками являются размеры конструкции, коррозия труб от постоянного смачивания водой и разброс капелек воды, поэтому такие теплообменники ограждают жалюзи или перегородками.

Пластинчатые теплообменники

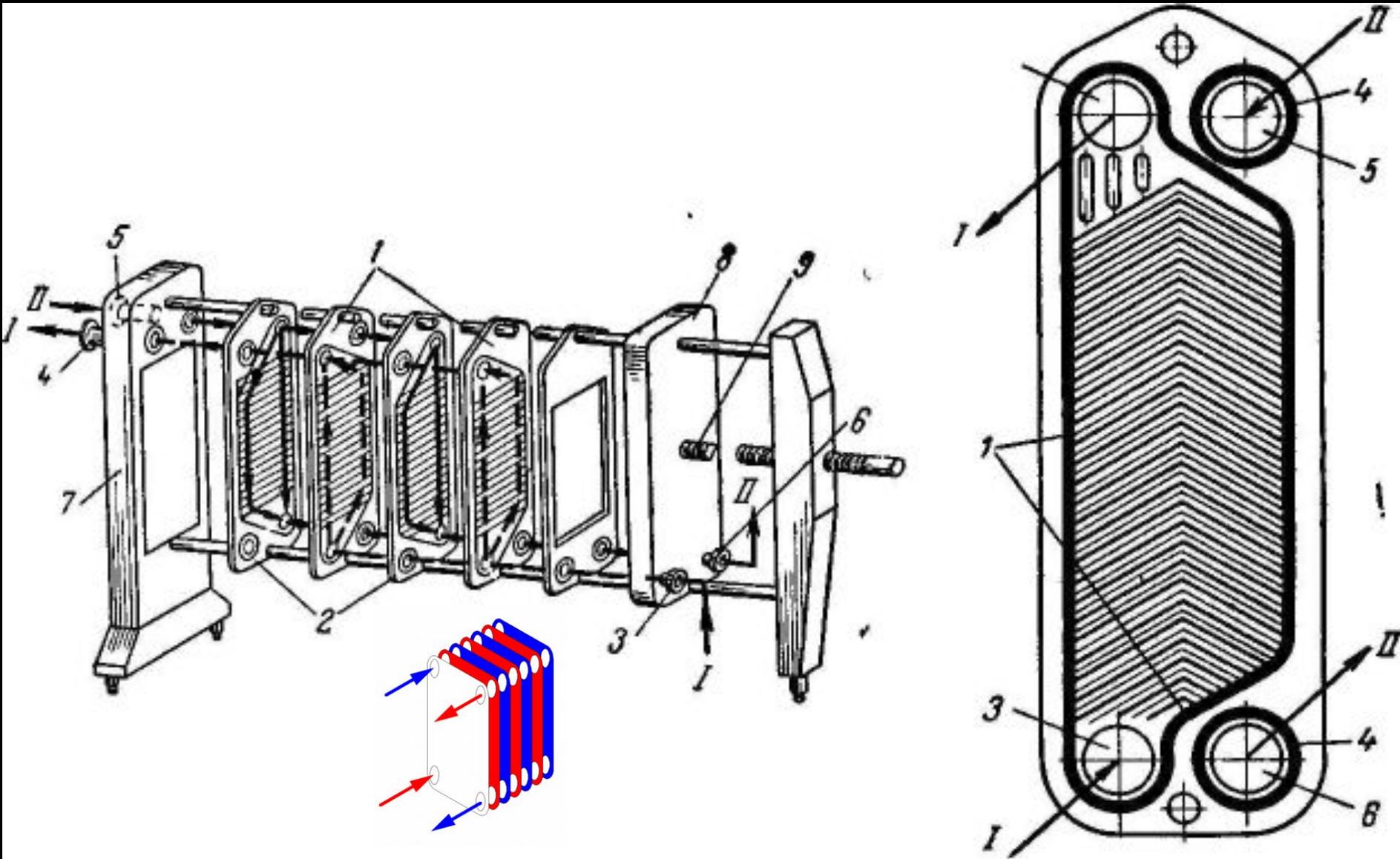
В пластинчатом теплообменнике поверхность теплообмена образуется гофрированными параллельными пластинами 1,2 с помощью которых создается система узких каналов шириной 3—6 мм с волнистыми стенками.

Жидкости, между которыми происходит теплообмен, движутся в каналах *между смежными пластинами, омывая противоположные боковые стороны каждой пластины.*

Достоинством такой конструкции является компактность легкость разборки и очистки.

К их недостаткам относятся: невозможность работы при высоких давлениях и трудность выбора эластичных химически, стойких материалов для прокладок.

Пластинчатый теплообменник



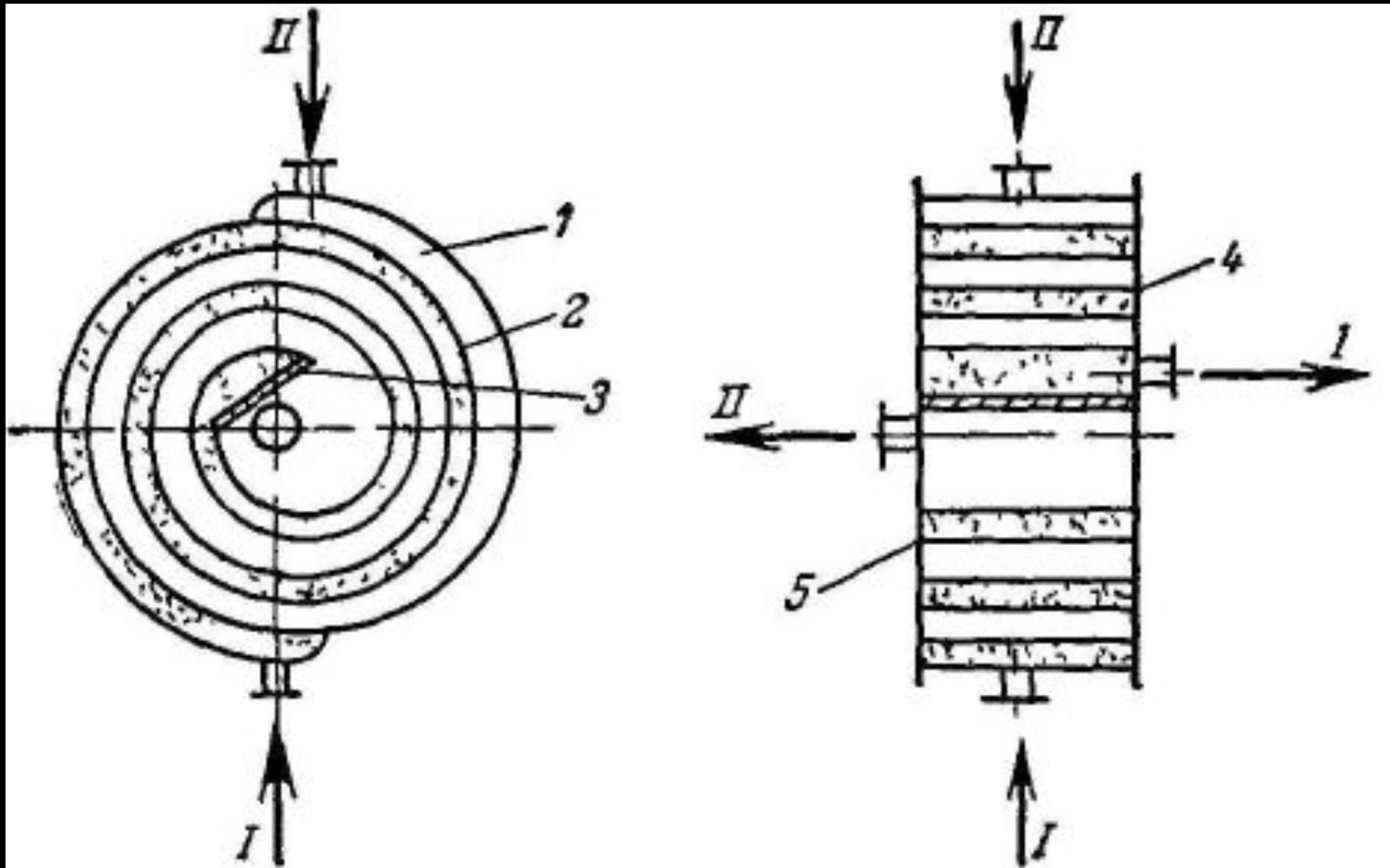
Спиральные теплообменники

В спиральном теплообменнике поверхность теплообмена образуется двумя металлическими листами 1 и 2, свернутыми по спирали.

Внутренние концы листов приварены к глухой перегородке 3, а их наружные концы сварены друг с другом. С торцов спирали закрыты установленными на прокладках плоскими крышками 4 и 5. Таким образом, внутри аппарата образуются два изолированных один от другого спиральных канала (шириной 2—8 мм), по которым, обычно противотоком, движутся теплоносители.

Теплоноситель I поступает через нижний штуцер и удаляется через боковой штуцер 6 правой крышке теплообменника, а теплоноситель II входит в верхний штуцер и удаляется через боковой штуцер в левой крышке.

Спиральный теплообменник



Спиральные теплообменники

Спиральные теплообменники весьма компактны, работают при высоких скоростях теплоносителей (для жидкостей 1—2 м/сек) и обладают при равных скоростях сред меньшим гидравлическим сопротивлением, чем трубчатые теплообменники различных типов.

Вместе с тем эти аппараты сложны в изготовлении и работают при ограниченных избыточных давлениях, не превышающих 10 атм, так как намотка спиралей затрудняется с увеличением толщины листов.

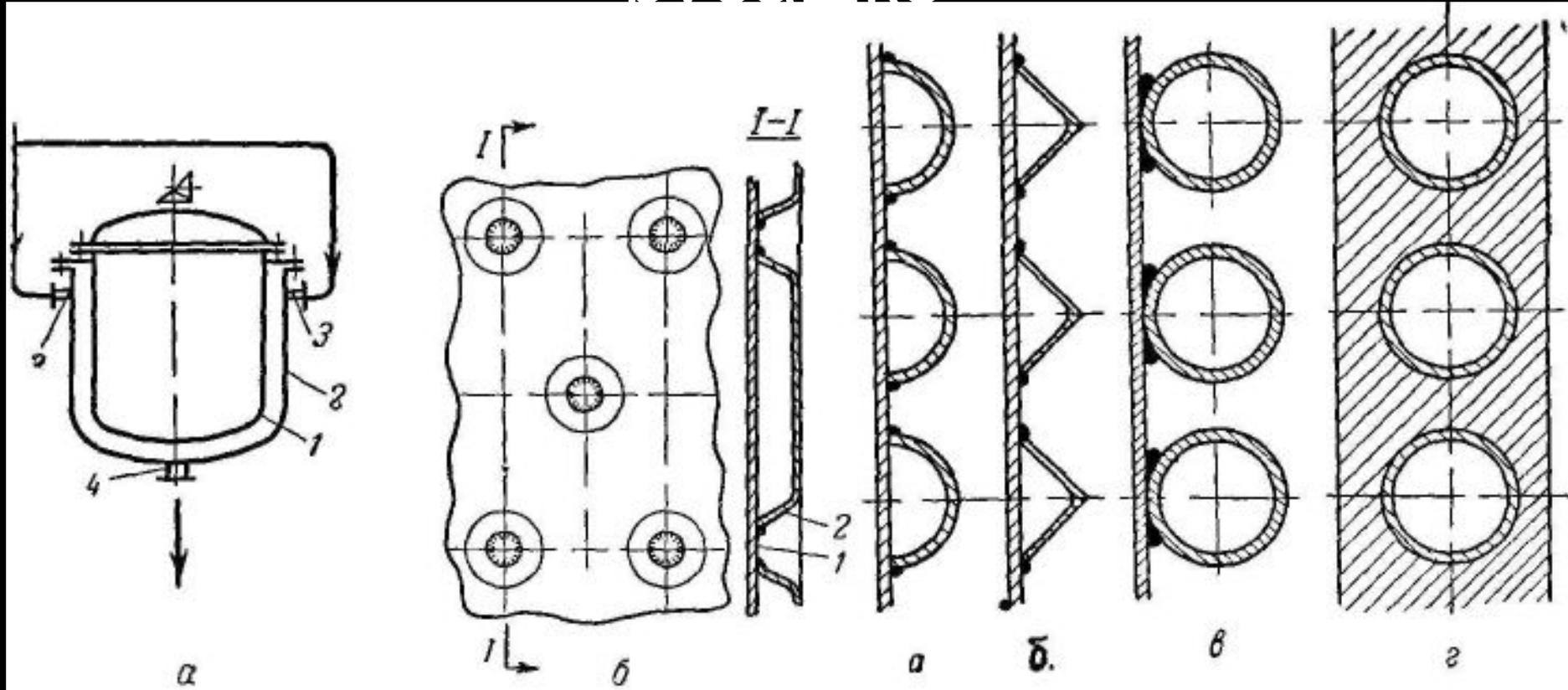
Теплообменники реакторов

Для обогрева и охлаждения реакционных и других аппаратов разнообразных конструкций применяют различные устройства, в которых поверхность теплообмена образуется стенками самого аппарата.

Самым простым вариантом такого теплообменника является рубашка. К корпусу аппарата 1 крепится рубашка 2. В пространстве между рубашкой и внешней поверхностью стенок аппарата движется теплоноситель.

Поверхность теплообмена рубашек ограничена площадью стенок и днища аппарата и обычно не превышает 10 м^2 . Давление теплоносителя в рубашке составляет не более 6—10 атм, поскольку при больших давлениях чрезмерно утолщаются стенки аппарата и рубашки.

Реакторные теплообменники и различные формы змеевика в рубашке



Анкерные связи и змеевики

Для увеличения диапазона давлений до 75 атм используются рубашки с анкерными связями (рис. б): рубашки с выштампованными в шахматном порядке отверстиями, которые приварены к стенке реактора. Это повышает прочность конструкции, а увеличенная скорость теплоносителя увеличивает коэффициент теплоотдачи.

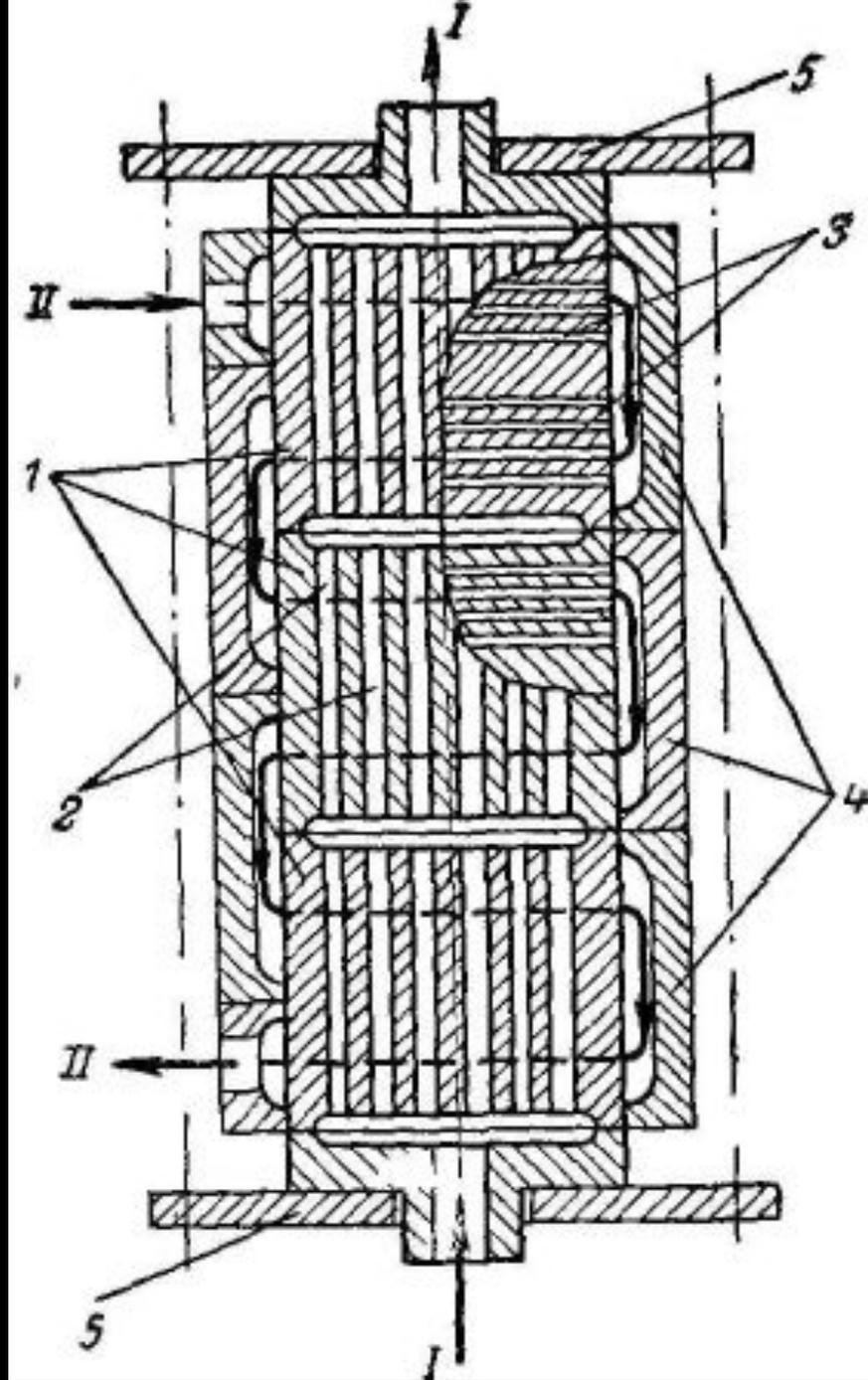
Альтернативным способом увеличения диапазона давлений (до 65 атм) является использование змеевиков, приваренных к корпусу реактора (рис II, а, б, в, г).

Блочные теплообменники

Иногда требуется работать с химически агрессивными веществами. В таких случаях теплообменник приходится изготавливать из химически стойкого материала, например, пропитанного фенолформальдегидными смолами графита.

Типичными теплообменными аппаратами из графита являются блочные теплообменники, состоящие из отдельных графитовых блоков 1, имеющих сквозные вертикальные каналы 2 круглого сечения и перпендикулярные им каналы 3. Теплоноситель I движется по вертикальным каналам, а теплоноситель II — по горизонтальным каналам 3. Горизонтальные каналы различных блоков сообщаются друг с другом через боковые переточные камеры 4.

Блочный графитовый теплообменник



Шнековые теплообменники

При тепловой обработке высоковязких жидкостей и сыпучих материалов, обладающих низкой теплопроводностью, теплоотдача может быть усилена путем непрерывного обновления поверхности материала, соприкасающегося со стенками аппарата. Это достигается при механическом перемешивании и одновременном перемещении материала с помощью шнеков.

Материал поступает у одного конца корпуса 1 с рубашкой 2 и перемешивается вращающимися навстречу друг другу шнеками 3 и 4, которые транспортируют его к противоположному, разгрузочному концу корпуса.

Шнековые теплообменники

