

Задачи по теплопередаче для подготовки к экзамену по ПиА ХТ

Задача 1

Требуется охладить 40 т/час толуола от температуры кипения при атмосферном давлении до 50°C. Охлаждающая вода нагревается от 20°C до 40°C. Коэффициент теплопередачи равен 550 Вт/(м²×К). Определить:

- требуемый расход воды в м³/час;
- среднюю разность температур для прямотока и противотока;
- требуемую площадь поверхности теплопередачи.

Решение

Решение этой задачи основано на:

1. умении пользоваться справочным материалом;
2. умении составлять тепловой баланс;
3. знании основного уравнения теплопередачи;
4. умении рассчитывать среднюю движущую силу процесса передачи теплоты для прямотока и противотока.

Если вы это знаете и умеете, то вперёд! Если нет – посмотрите сначала теорию.

Прежде всего, определяем, какой конкретно процесс передачи теплоты происходит в данном случае. Согласно условию, горячий поток (толуол) охлаждается, а холодный (вода) нагревается. По принятой на лекции классификации к этому процессу применимо **первое уравнение** теплового баланса (см. <http://filippov.samgtu.ru/sites/filippov.samgtu.ru/files/05-02-04.pdf>). А средняя разность температур для прямотока и противотока будет иметь различные значения. Запоминаем: если температуры обоих потоков меняются, то противоток даёт большее значение средней разности температур, чем прямоток. Если же температура хотя бы одного потока не меняется (кипение или конденсация), то прямоток и противоток равноценны. Более подробно см.

<http://filippov.samgtu.ru/sites/filippov.samgtu.ru/files/05-02-05.pdf>

1. По справочнику находим температуру кипения толуола при атмосферном давлении. Она равна 111°C. <http://filippov.samgtu.ru/node/16>

2. Теперь можно найти среднюю разность температур.

Если организовать чистый прямоток, то получим


$$\Delta t_{\theta} = t_{1H} - t_{2H} = 111 - 20 = 91^{\circ} \quad \Delta t_M = t_{1K} - t_{2K} = 50 - 40 = 10^{\circ}$$

Средняя разность температур при организации прямотока будет равна

$$\Delta t_{\text{ср. прям.}} = \frac{\Delta t_{\text{б}} - \Delta t_{\text{м}}}{\ln \frac{\Delta t_{\text{б}}}{\Delta t_{\text{м}}}} = \frac{91 - 10}{\ln \frac{91}{10}} \approx 37^{\circ} \text{C} = 37 \text{ K}.$$

Я здесь показал разность температур как по шкале Цельсия, так и по шкале Кельвина. На лекции мы говорили, что эти разности будут одинаковы. И в принципе перевод делать не надо!

Если же организуем чистый противоток, то результат будет другим



$$\Delta t_{\text{б}} = t_{1\text{н}} - t_{2\text{н}} = 111 - 20 = 91^{\circ} \quad \Delta t_{\text{м}} = t_{1\text{к}} - t_{2\text{к}} = 50 - 40 = 10^{\circ}$$

$$\Delta t_{\text{ср. прот.}} = \frac{\Delta t_{\text{б}} - \Delta t_{\text{м}}}{\ln \frac{\Delta t_{\text{б}}}{\Delta t_{\text{м}}}} = \frac{71 - 30}{\ln \frac{71}{30}} \approx 48^{\circ} \text{C} = 48 \text{ K}.$$

На практике как правило не бывает ни чистого прямого тока, ни чистого противотока. Скорее всего будет реализован или смешанный ток, или перекрёстный ток. У них средняя разность температур будет больше, чем для прямого тока, но меньше, чем для противотока. Не погружаясь в дебри теории, возьмём среднее арифметическое между полученными значениями разности температур и будем полученный результат использовать в дальнейших расчётах

$$\Delta t_{\text{ср}} = \frac{\Delta t_{\text{ср. прям.}} + \Delta t_{\text{ср. прот.}}}{2} = \frac{37 + 48}{2} \approx 43^{\circ} \text{C} = 43 \text{ K}.$$

3. Теперь нужно найти средние температуры потоков (толуола и воды). Используем известное правило: для потока, температура которого меняется на меньшее число градусов, берём среднюю арифметическую температуру. А для второго потока используем формулу

$$\Delta t_{\text{ср}} = t_{\text{ср1}} - t_{\text{ср2}}.$$

В нашей задаче вода меняет температуру на 20°C , а толуол на 61°C . Следовательно, средняя температура воды будет равна

$$t_{cp2} = \frac{t_{2н} + t_{2к}}{2} = \frac{20 + 40}{2} = 30^{\circ}C.$$

А средняя температура толуола

$$t_{cp1} = \Delta t_{cp} + t_{cp2} = 43 + 30 = 73^{\circ}C \approx 70^{\circ}C.$$

Здесь я немного округлил температуру толуола для упрощения пользования справочником.

4. Для найденных температур по справочнику находим значения удельных теплоёмкостей толуола и воды <http://filippov.samgtu.ru/node/10> и <http://filippov.samgtu.ru/node/17>

$$c_1 = 1936 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}};$$

$$c_2 = 4180 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

5. Составляем уравнение теплового баланса, из которого определяем тепловую нагрузку на аппарат Q без учёта потерь теплоты в окружающую среду

$$Q = G_1 c_1 (t_{1н} - t_{1к}) = G_2 c_2 (t_{2к} - t_{2н}) =$$

$$= \frac{40 \cdot 1000}{3600} \cdot 1936 \cdot (111 - 50) = 1312178 \text{ Вт}$$

6. Требуемый расход охлаждающей воды массовый

$$G_2 = \frac{Q}{c_2 (t_{2к} - t_{2н})} = \frac{1312178}{4180(40 - 20)} = 15,7 \frac{\text{кг}}{\text{с}}.$$

7. Объёмный расход охлаждающей воды найдём, зная её плотность при средней температуре 30°C (<http://filippov.samgtu.ru/node/17>)

$$V_2 = \frac{G_2}{\rho_2} = \frac{15,7}{996} = 0,01576 \frac{\text{м}^3}{\text{с}} = 56,7 \frac{\text{м}^3}{\text{час}}.$$

8. Требуемая площадь поверхности теплопередачи

$$F_{тр} = \frac{Q}{K \Delta t_{cp}} = \frac{1312178}{550 \cdot 43} = 55,5 \text{ м}^2$$

Ответ:

- требуемый расход воды $56,7 \text{ м}^3/\text{час}$,
- средняя разность температур 43°C , для прямотока 37°C , для противотока 48°C ;
- требуемая площадь поверхности теплопередачи $55,5 \text{ м}^2$.

Задача 2

Требуется подогреть 30 т/час этанола от 40°C до температуры кипения при атмосферном давлении. В качестве теплоносителя используется конденсат водяного пара давлением 3 ат (абс). Расход конденсата 20 т/час. Коэффициент теплопередачи равен $350 \text{ Вт}/(\text{кг}\times\text{К})$. Определить:

- конечную температуру парового конденсата;
- среднюю разность температур для прямотока и противотока;
- требуемую площадь поверхности теплопередачи.

Решение

Решение этой задачи основано на:

1. умении пользоваться справочным материалом;
2. умении составлять тепловой баланс;
3. знании основного уравнения теплопередачи;
4. умении рассчитывать среднюю движущую силу процесса передачи теплоты для прямотока и противотока.

Прежде всего определяем, какой конкретно процесс передачи теплоты происходит в данном случае. Согласно условию, горячий поток (конденсат водяного пара или попросту вода) охлаждается, а холодный поток (этиловый спирт) нагревается. По принятой на лекции классификации к этому процессу применимо **первое уравнение** теплового баланса (см. <http://filippov.samgtu.ru/sites/filippov.samgtu.ru/files/05-02-04.pdf>). А средняя разность температур для прямотока и противотока будет иметь различные значения (снова см. <http://filippov.samgtu.ru/sites/filippov.samgtu.ru/files/05-02-05.pdf>). Их сравнение дано в решении задачи 1.

1. По таблице свойств водяного пара (см. <http://filippov.samgtu.ru/node/18>) находим температуру конденсации водяного пара при **абсолютном** давлении 3 ат и, следовательно, температуру образовавшегося конденсата (горячей воды): $t_{1н} = 133^\circ\text{C}$. Я специально выделил слово «абсолютное». Дело в том, что на производстве под давлением понимают как правило избыточное или манометрическое давление. Производственник на вопрос, под каким давлением подаётся конденсат (в нашей задаче) даст мгновенный ответ – 2 «килограмма». Под килограммом при этом понимается $\text{кГс}/\text{см}^2$. Т.е. будет названо давление, которое показывает манометр. Ответ совершенно правильный! Но для технологических расчётов нужно абсолютное давление! Мы об этом говорили на лекции по гидростатике, когда изучали давление:

http://filippov.samgtu.ru/sites/filippov.samgtu.ru/files/04-02_davlenie.pdf

2. температура кипения этилового спирта при атмосферном давлении согласно справочнику равна $t_{2к} = 78^{\circ}\text{C}$. <http://filippov.samgtu.ru/node/16>

3. По справочнику найдём удельную теплоёмкость этанола при его примерной средней температуре 60°C <http://filippov.samgtu.ru/node/10>

$$c_2 = 2967 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

4. Составляем тепловой баланс и определяем тепловую нагрузку на аппарат Q (без учёта потерь теплоты в окружающую среду), используя данные для потока этилового спирта – второго по нашей классификации

$$\begin{aligned} Q &= G_1 c_1 (t_{1н} - t_{1к}) = G_2 c_2 (t_{2к} - t_{2н}) = \\ &= \frac{30 \cdot 1000}{3600} \cdot 2967 \cdot (78 - 40) = 939550 \text{ Вт}. \end{aligned}$$

5. Вычислим из предыдущего уравнения конечную температуру конденсата (воды) на выходе из аппарата

$$t_{1к} = t_{1н} - \frac{Q}{G_1 c_1} = 133 - \frac{939550}{\frac{20000}{3600} \cdot 4270} = 93^{\circ}\text{C}.$$

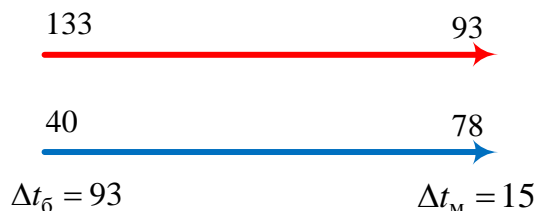
где $c_1 = 4270 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$ - удельная теплоёмкость воды при 130°C (справочник)

<http://filippov.samgtu.ru/node/17>

6. Вычисляем среднюю разность температур для прямотока

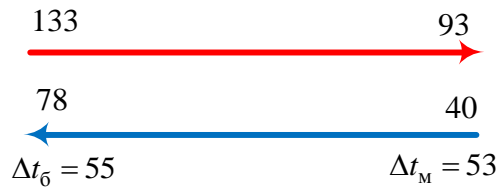
<http://filippov.samgtu.ru/sites/filippov.samgtu.ru/files/05-02-05.pdf>.

Обозначения температур те же, что и в задаче 1. Т.е. горячий поток охлаждается от 133 до 93°C , а холодный нагревается от 40 до 78°C .



$$\Delta t_{\text{ср.прям}} = \frac{\Delta t_6 - \Delta t_m}{\ln \frac{\Delta t_6}{\Delta t_m}} = \frac{93 - 15}{\ln \frac{93}{15}} = 43^{\circ}\text{C}.$$

7. Вычислим среднюю разность температур для противотока



$$\Delta t_{\text{ср.прот}} = \frac{\Delta t_{\text{б}} - \Delta t_{\text{м}}}{\ln \frac{\Delta t_{\text{б}}}{\Delta t_{\text{м}}}} = \frac{55 - 53}{\ln \frac{55}{53}} = 54^{\circ}\text{C}.$$

Усреднённое значение движущей силы процесса передачи теплоты будет равно

$$\Delta t_{\text{ср}} = \frac{\Delta t_{\text{ср.прям.}} + \Delta t_{\text{ср.прот.}}}{2} = \frac{43 + 54}{2} \approx 49^{\circ}\text{C}.$$

8. Требуемая площадь поверхности теплопередачи

$$F_{\text{тр}} = \frac{Q}{K\Delta t_{\text{ср}}} = \frac{939550}{350 \cdot 49} \approx 55 \text{ м}^2$$

Ответ:

- конечная температура парового конденсата на выходе из аппарата 93°C ;
- средняя разность температур 49°C , для прямотока 43°C , для противотока 54°C ;
- требуемая площадь поверхности теплопередачи 55 м^2 .

Задача 3

Требуется испарять этиловый спирт в количестве 15 т/час. Этанол в кипятильник подаётся при температуре кипения при атмосферном давлении. В качестве теплоносителя используется водяной пар с абсолютным давлением 4 ат. Коэффициент теплопередачи равен $750 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \times \text{К})$. Определить:

- расход водяного пара в кг/с;
- среднюю разность температур для прямотока и противотока;
- требуемую площадь поверхности теплопередачи;
- стоимость работы кипятильника в час, сутки, месяц, год при условии, что теплоноситель приобретается у сторонней организации по цене 1000 руб. за гигакалорию.

Решение

Решение этой задачи основано на:

1. умении пользоваться справочным материалом;

2. умения составлять тепловой баланс;
3. знания основного уравнения теплопередачи;
4. умения рассчитывать среднюю движущую силу процесса передачи теплоты.
5. Ну, и на простейших экономических расчётах.

Сначала выясняем, какой поток получает теплоту, а какой её отдаёт. По условию задачи требуется испарять, т.е. переводить в пар этиловый спирт. Этот процесс требует подвода теплоты. Следовательно, этанол – это холодный поток, а водяной пар – горячий. Причём оба процесса протекают при постоянной температуре – изотермические. Согласно принятой в лекционном курсе классификации этот процесс описывается четвёртым уравнением теплового баланса.

1. По справочнику находим температуру конденсации насыщенного водяного пара давлением 4 ат (абс) (<http://filippov.samgtu.ru/node/18>):

$$t_{1н} = t_{1к} = 143^{\circ}C.$$

2. По справочнику находим температуру кипения этилового спирта при атмосферном давлении (<http://filippov.samgtu.ru/node/16>)

$$t_{2н} = t_{2к} = 78^{\circ}C.$$

3. Теплота испарения этанола при температуре $\sim 80^{\circ}C$ равна (см. <http://filippov.samgtu.ru/node/15>)

$$r_2 = 851 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

4. Тепловая нагрузка на аппарат без учёта потерь теплоты в окружающую среду

$$Q = G_2 r_2 = \frac{15 \cdot 1000}{3600} \cdot 851 = 3546 \frac{\text{кДж}}{\text{с}} = 3546 \text{кВт}.$$

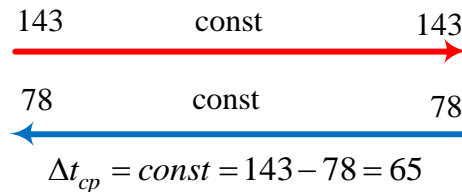
5. Согласно справочнику, удельная теплота конденсации водного пара, имеющего абсолютное давление давлением 4 ат (см. <http://filippov.samgtu.ru/node/18>)

$$r_1 = 2141 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

6. Расход водяного пара без учёта потерь теплоты в окружающую среду

$$G_1 = \frac{Q}{r_1} = \frac{3546}{2141} = 1,7 \frac{\text{кг}}{\text{с}}.$$

7. В нашем случае оба потока являются изотермическими – не меняют свои температуры. Средняя разность температур не зависит от способа организации теплообмена и равна просто разности температур между горячим и холодным потоками



$$\Delta t_{cp} = 143 - 78 = 65^{\circ}\text{C} = 65 \text{ K}.$$

8. Требуемая площадь поверхности теплопередачи (не забываем тепловую нагрузку перевести из кВт в Вт!)

$$F_{\text{тр}} = \frac{Q}{K\Delta t_{cp}} = \frac{3546 \cdot 1000}{750 \cdot 65} = 72,7 \text{ м}^2$$

Теперь рассчитаем, во сколько нам обойдётся эксплуатация этого кипятильника. В пункте 4 мы нашли требуемую тепловую мощность 3546 кВт. Т.е. каждую секунду нужно подводить 3546 кДж теплоты. Переведём в калории: 1 кал – это 4,18 Дж. Следовательно, каждую секунду нужно подводить 848,3 ккал. В час это составит 3053971 ккал или 3,05 Гкал. За которые придётся заплатить 3050 руб. В сутки плата составит 73200 руб. В месяц 2196000 руб. А в год 26352000 руб. Впечатляет? И это без учёта потерь теплоты в окружающую среду, которые обычно составляют 5%. Вот поэтому наши предприятия нефтепереработки и нефтехимии давно перешли на собственную генерацию не только теплоты, но и электроэнергии.

Ответ:

- расход водяного пара без учёта потерь теплоты **1,7 кг/с;**
- средняя разность температур не зависит от способа организации теплообмена и равна **65°C = 65 K;**
- требуемая площадь поверхности теплопередачи **72,7 м².**
- стоимость эксплуатации кипятильника в час **3050 руб.,** в сутки **73200,** в месяц **2196000 руб.,** в год **26352000 руб.**

Задача 4

Требуется при атмосферном давлении конденсировать 30 т/час бензола. В качестве хладагента используется обратная вода, которая нагревается от 20°C до 45°C. Коэффициент теплопередачи равен 700 Вт/(м²×К). Определить:

- расход охлаждающей воды в м³/час;
- среднюю разность температур для прямотока и противотока;
- требуемую площадь поверхности теплопередачи.

Решение

Решение этой задачи основано на:

1. умении пользоваться справочным материалом;
2. умении составлять тепловой баланс;
3. знании основного уравнения теплопередачи;
4. умении рассчитывать среднюю движущую силу процесса передачи теплоты.

Сначала выясним, какой поток отдаёт теплоту, т.е. является горячим, а какой теплоту получает и, следовательно, является холодным. При конденсации, т.е. переходе вещества из состояния пара в жидкую фазу происходит выделение теплоты. Следовательно, бензол – это горячий поток. А вода – холодный. Далее, для рассматриваемого случая применимо второе уравнение теплового баланса (по классификации, изложенной в лекции, см. <http://filippov.samgtu.ru/sites/filippov.samgtu.ru/files/05-02-04.pdf>). Кроме того, так как один процесс – конденсация бензола – является изотермическим, то противоток и прямоток дадут одинаковые значения средней разности температур.

1. Согласно справочнику, температура конденсации (кипения) бензола при атмосферном давлении (<http://filippov.samgtu.ru/node/16>)

$$t_{1н} = t_{1к} = 80^{\circ}C.$$

2. При этой температуре теплота конденсации бензола составляет (<http://filippov.samgtu.ru/node/18>)

$$r_1 = 395 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

3. Тепловая нагрузка на аппарат согласно второму уравнению теплового баланса составляет

$$Q = G_1 r_1 = G_2 c_2 (t_{2к} - t_{2н}) = \frac{30 \cdot 1000}{3600} \cdot 395 = 3292 \text{ кВт}.$$

4. Удельная теплоёмкость воды при её средней температуре примерно 30°C равна (это число любой уважающий себя специалист должен помнить!)

$$c_2 = 4,18 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

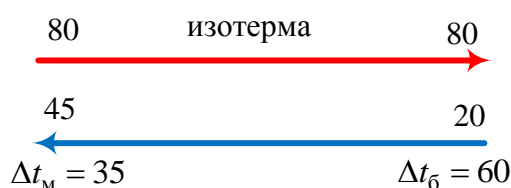
5. Массовый расход охлаждающей воды (тут можно оставить кВт и кДж, но помним об этом!)

$$G_2 = \frac{Q}{c_2(t_{2к} - t_{2н})} = \frac{3292}{4,18 \cdot (45 - 20)} = 31,5 \frac{\text{кг}}{\text{с}}.$$

6. Объёмный расход охлаждающей воды с учётом её плотности при 30°C (<http://filippov.samgtu.ru/node/17>)

$$V_2 = \frac{G_2}{\rho_2} = \frac{31,5}{996} = 0,032 \frac{\text{м}^3}{\text{с}} = 114 \frac{\text{м}^3}{\text{час}}.$$

7. Средняя разность температур



$$\Delta t_{cp} = \frac{\Delta t_6 - \Delta t_m}{\ln \frac{\Delta t_6}{\Delta t_m}} = \frac{60 - 35}{\ln \frac{60}{35}} = 46^0 \text{C} = 46 \text{ К}.$$

8. Требуемая площадь поверхности теплопередачи (не забываем тепловую нагрузку перевести из кВт в Вт!)

$$F_{тр} = \frac{Q}{K \Delta t_{cp}} = \frac{3292 \cdot 1000}{700 \cdot 46} = 102,2 \text{ м}^2$$

Ответ:

- расход охлаждающей воды 114 м³/час;
- средняя разность температур не зависит от способа организации теплообмена и равна 46°C;
- требуемая площадь поверхности теплопередачи 102,2 м².

Задача 5

На складе оборудования имеется кожухотрубчатый теплообменник, состоящий из 36 труб диаметром 18×2 мм и длиной 2,5 м. Достаточно ли поверхность теплообменника для конденсации 500 кг/час этилового спирта? Теплота конденсации снимается водой, которая нагревается с 20°C до 40°C . Коэффициент теплопередачи считать равным $600 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \times \text{K})$.

Решение

Для успешного решения этой задачи нужно:

- уметь рассчитывать площадь цилиндра по известным диаметру и длине;
- находить тепловую нагрузку на аппарат по уравнению теплового баланса;
- вычислять среднюю разность температур для прямотока и противотока;
- использовать в расчётах основное уравнение теплопередачи.

Данная задача сводится к сравнению двух величин: площади поверхности теплопередачи имеющегося аппарата и площади поверхности теплопередачи аппарата, которая требуется для проведения процесса. Если окажется, что площадь поверхности имеющегося аппарата больше, чем требуется, то теплообменник в принципе можно применять. А вот если выяснится, что требуемая площадь теплопередачи больше имеющейся, то аппарат однозначно не подходит.

1. Определим площадь поверхности теплопередачи имеющегося аппарата

$$F_{\text{ап}} = n\pi dl,$$

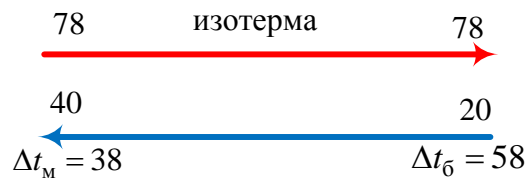
где n – число труб трубного пучка; d – диаметр трубы, l – длина труб. Вроде всё просто и понятно, за исключением того, какой диаметр в эту формулу подставлять. Мы привыкли, что у трубы два диаметра – наружный и внутренний. Пар конденсируется на наружной поверхности, т.е. он «видит» наружный диаметр. А вода движется внутри труб, она «видит» внутренний диаметр. Поэтому подставим в формулу среднее значение диаметра – 16 мм. Получим

$$F_{\text{ап}} = n\pi dl = 36 \cdot 3,14 \cdot 0,016 \cdot 2,5 = 4,5 \text{ м}^2.$$

2. Для вычисления требуемой поверхности теплопередачи надо найти тепловую нагрузку на аппарат и среднюю разность температур. По справочнику находим температуру конденсации этилового спирта при атмосферном давлении 78°C . Округлив эту температуру до ближайшего кратного 10°C значения, найдём теплоту конденсации

$$r_1 = 851 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

3. Средняя разность температур



$$\Delta t_{cp} = \frac{\Delta t_6 - \Delta t_M}{\ln \frac{\Delta t_6}{\Delta t_M}} = \frac{58 - 38}{\ln \frac{58}{38}} = 47^0 C = 47 K.$$

4. Тепловая нагрузка на аппарат

$$Q = G_1 r_1 = \frac{500}{3600} \cdot 851 = 118,2 \text{ кВт.}$$

5. Требуемая площадь поверхности теплопередачи без учёта потерь теплоты в окружающую среду

$$F_{тр} = \frac{Q}{K \cdot \Delta t_{cp}} = \frac{118,2 \cdot 1000}{600 \cdot 47} = 4,19 \text{ м}^2.$$

Вывод: имеющийся теплообменный аппарат имеет большую площадь поверхности теплопередачи, чем требуется. Следовательно, его можно использовать для проведения процесса конденсации этилового спирта с расходом 500 кг/час.