

**В.Д. Галдин**

# **ГЕНЕРАТОРЫ ТЕПЛОТЫ**

Учебно-методическое пособие

**Омск - 2013**

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего профессионального образования  
«Сибирская государственная автомобильно-дорожная академия»

Кафедра городского строительства и хозяйства

В. Д. Галдин

## ГЕНЕРАТОРЫ ТЕПЛОТЫ

Учебно-методическое пособие

Омск  
СибАДИ  
2013

УДК 658.26  
ББК 31.3  
Г-15

*Рецензент д-р техн. наук, проф. И.Л. Чулкова*

Работа одобрена научно-методическим советом направления 270800 – «Строительство» Инженерно-строительного института.

**Галдин В.Д. Генераторы теплоты:** учебно-методическое пособие / В.Д. Галдин. – Омск: СибАДИ, 2013. – 114 с.

Рассмотрены термодинамические свойства воды и водяного пара, термодинамические таблицы, диаграммы и основные процессы для воды и водяного пара. Представлены циклы паросиловой установки Ренкина, с регенерацией, с промежуточным перегревом пара, теплофикационные циклы. Рассмотрены циклы газотурбинных установок с подводом теплоты при постоянном давлении и объеме, с регенерацией теплоты. Приведены схемы парогазовой установки и установки для комплексного производства теплоты и твердого диоксида углерода.

Приведены примеры расчета паросиловых установок и ее элементов. Представлены варианты задач для самостоятельного решения и контрольные вопросы и задачи.

Учебно-методическое пособие предназначено для бакалавров направления 270800 – «Строительство» профиля подготовки «Теплогазоснабжение и вентиляция» при выполнении практических занятий, курсового проектирования и самостоятельной работы по дисциплине «Генераторы тепла и системы автономного теплоснабжения».

© ФГБОУ ВПО «СибАДИ», 2013

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ</b> .....	3
<b>1. ТЕРМОДИНАМИКА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК</b> .....	5
1.1. Термодинамические свойства воды и водяного пара .....	5
1.1.1. Термодинамические свойства паров .....	5
1.1.2. Водяной пар. Парообразование при постоянном давлении .....	6
1.1.3. Таблицы и диаграммы для воды и водяного пара .....	7
1.1.4. Основные термодинамические процессы водяного пара .....	12
1.2. Определение параметров воды и водяного пара по таблицам .....	16
1.2.1. Цель и задачи работы .....	16
1.2.2. Проведение работы .....	17
Контрольные вопросы .....	19
1.3. Паросиловые установки .....	20
1.3.1. Цикл паросиловой установки – цикл Ренкина .....	20
1.3.2. Цикл паротурбинной установки с регенерацией .....	24
1.3.3. Цикл паротурбинной установки с промежуточным перегре- вом пара .....	25
1.3.4. Теплофикационный цикл паросиловой установки .....	26
1.4. Газотурбинные установки .....	28
1.4.1. Цикл с подводом теплоты при $p = \text{const}$ .....	29
1.4.2. Цикл с подводом теплоты при $v = \text{const}$ .....	30
1.4.3. Цикл с регенерацией теплоты .....	33
1.5. Комбинированные силовые установки .....	35
1.5.1. Парогазовая установка .....	35
1.5.2. Установка для комплексного производства теплоты и твердо- го диоксида углерода .....	36
Контрольные вопросы .....	38
<b>2. РАСЧЕТ ТЕПЛОВЫХ СХЕМ И ЭЛЕМЕНТОВ ЭНЕРГЕТИЧЕ- СКИХ УСТАНОВОК</b> .....	40
2.1. Расчет паросиловых установок .....	40
2.2. Расчет газотурбинных установок .....	70
Контрольные задачи .....	73
Список рекомендуемой литературы .....	79
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ</b> .....	80

## ВВЕДЕНИЕ

Жизнь современного человека на Земле немыслима без использования электрической энергии и теплоты. Для их производства используются природные энергетические ресурсы, большая часть которых связана с солнечной энергией. Сюда относятся химически связанная энергия органических топлив (ископаемых углей, нефти, природного газа, торфа, дров), гидравлическая энергия падающей воды рек, энергия ветра и непосредственно солнечного излучения. Мировые запасы органического топлива оцениваются следующим образом: уголь – 220–330 лет; газ – 35–60 лет; нефть – 25–50 лет.

К энергетическим ресурсам, не связанным с энергией солнечного излучения, относятся энергия распада ядер атомов некоторых тяжелых элементов (урана, тория), геотермальная энергия недр Земли, энергия приливов и отливов в океанах.

Одной из основных тенденций мирового топливно-энергетического баланса является снижение доли нефти, связанное с увеличением глубины ее переработки. В то же время наблюдается снижение темпов роста доли атомной энергетики в мировом балансе.

В целом, в перспективе ближайших 40–50 лет прирост генерирующих мощностей в мире будет обеспечиваться в немалой степени за счет *тепловых электрических станций* (ТЭС) на органическом топливе, в том числе и за счет более широкого использования низкосортных топлив.

Наибольшее распространения в энергетике в настоящее время получили ТЭС, на которых тепловая энергия, выделяющаяся при сжигании органических топлив, преобразуется в электрическую энергию. На их долю приходится около 75 % вырабатываемой электроэнергии на Земле и около 80 % производимой электроэнергии в России. Основным назначением электрических станций является выработка электроэнергии для освещения, транспорта, коммунального хозяйства и бытовых нужд.

Другим назначением электрических станций (тепловых) является снабжение жилых домов, учреждений и предприятий теплом для отопления зимой и горячей водой для коммунальных и бытовых целей или паром для производства. Тепловые электрические станции для комбинированной выработки электрической и тепловой энергии (для теплофикации) называются *теплоэлектроцентралями* (ТЭЦ).

# 1. ТЕРМОДИНАМИКА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

## 1.1. Термодинамические свойства воды и водяного пара

### 1.1.1. Термодинамические свойства паров

Любое чистое вещество может находиться в твердой, жидкой или газообразной фазе. Переход вещества из одной фазы в другую связан с изменением параметров при передаче теплоты. Промежуточное состояние вещества между газом и жидкостью называется *паром*. Приблизительно соотношение между параметрами пара можно характеризовать уравнением Клапейрона-Менделеева или уравнением Ван-дер-Ваальса.

Если сжимать газ при постоянной температуре, то можно достичь состояния насыщения (сжижения газа), соответствующего этой температуре и некоторому определенному давлению. При дальнейшем сжатии пар будет конденсироваться и в определенный момент полностью превратится

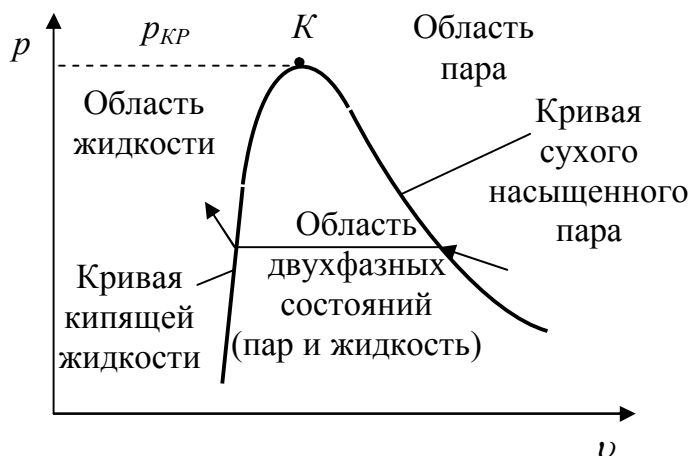


Рис. 1.1. Диаграмма реального газа

в жидкость. Процесс перехода пара в жидкость происходит при постоянных температуре и давлении, так как давление насыщенного пара однозначно определяется температурой. На  $p-v$ -диаграмме (рис. 1.1) область двухфазных состояний (пар и жидкость) лежит между кривыми кипящей жидкости и сухого насыщенного пара. При увеличении давления эти кривые сближаются. Сближение происходит потому, что объем пара уменьшается, а объем жидкости увеличивается. При некотором определенном для данной жидкости (пара) давлении кривые кипящей жидкости и пара встречаются в *критической точке*  $K$ , которой соответствуют критические параметры: давление  $p_{кр}$ , температура  $T_{кр}$ , удельный объем  $v_{кр}$ , характеризующие критическое состояние вещества. При критическом состоянии исчезают различия

между жидкостью и паром. При температуре более высокой, чем критическая, газ ни при каком давлении не может сконденсироваться, т.е. превратиться в жидкость.

### 1.1.2. Водяной пар. Парообразование при постоянном давлении

Водяной пар получил широкое распространение как рабочее вещество в тепловых двигателях и как движущая среда, используемая для осуществления процесса теплообмена в теплообменных аппаратах.

Водяной пар есть вода в газообразном состоянии.

Процесс превращения воды в пар называется *парообразованием* и может осуществляться двумя различными по интенсивности и характеру процессами: испарением и кипением.

Под *испарением* понимают парообразование, происходящее на свободной поверхности воды при температуре ниже точки кипения при данном давлении.

*Кипение* – процесс интенсивного испарения не только со свободной поверхности воды, но и со всего объема образующихся внутри пузырьков пара.

Рассмотрим процесс парообразования 1 кг воды, заключенного в цилиндр 1 с подвижным поршнем 2 (рис. 1.2), давление под которым в течение всего процесса остается постоянным. Предположим, что в начальном состоянии (положение поршня 0) вода находится при  $t_0 = 0^\circ\text{C}$  и занимает объем  $\nu_0 = 0,001 \text{ м}^3/\text{кг}$ .

При изобарном процессе подвода теплоты к воде температура и удельный объем воды будет увеличиваться, и при достижении некоторой температуры  $t_S$  вода закипит. На рис. 1.2 состоянию воды на границе кипения соответствует положение поршня 1.

При дальнейшем подводе теплоты начинается парообразование. Часть молекул пара, движущихся в пространстве под поршнем равномерно по всем направлениям, соприкасается с поверхностью воды и возвращается обратно в нее. Происходит процесс превращения пара в жидкость (*конденсация*). В некоторый момент, когда скорости конденсации

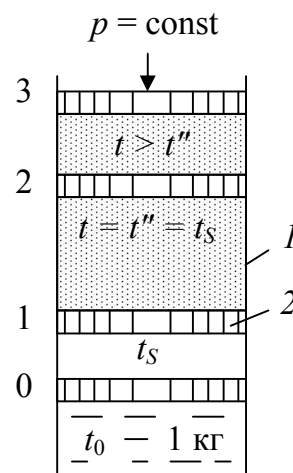


Рис. 1.2. Процесс парообразования

и парообразования сравниваются, в системе наступает динамическое равновесие.

Пар, находящийся в термодинамическом равновесии с водой, из которой он образуется, называется *насыщенным*.

Влажный насыщенный пар представляет собой смесь пара с жидкостью, причем жидкость может быть сосредоточена в нижней части цилиндра или равномерно распределена в виде мельчайших капель по всему объему.

Процесс парообразования идет при постоянном давлении и температуре (изобарно-изотермический процесс). Вследствие этого свойства насыщенного пара определяются температурой, являющейся функцией давления среды, в которой происходит процесс парообразования. При подводе теплоты в процессе парообразования количество пара будет возрастать с одновременным уменьшением количества кипящей воды. Положение поршня 2 на рис. 1.2 соответствует моменту окончания процесса парообразования.

Количество теплоты, необходимое для превращения 1 кг кипящей воды в сухой насыщенный пар, называется *теплотой парообразования*.

Во всех промежуточных состояниях между первым и вторым положениями поршня (см. рис. 1.2) под ним находится влажный насыщенный пар, представляющий собой смесь  $m'$  кг кипящей жидкости и  $m''$  кг сухого насыщенного пара.

Отношение  $x = \frac{m''}{m'+m''}$  называют *степенью сухости* влажного насыщенного пара, а величину  $1-x = \frac{m'}{m'+m''}$  – *степенью влажности*. Степень сухости изменяется от  $x = 0$  (кипящая вода) до  $x = 1$  (сухой насыщенный пар).

При подводе теплоты сухой насыщенный пар переходит в состояние перегретого пара (положение поршня 3 на рис. 1.2). Под перегретым понимают пар, температура которого выше температуры насыщенного пара того же давления.

### **1.1.3. Таблицы и диаграммы для воды и водяного пара**

Количественные соотношения между различными параметрами и функциями состояния воды, сухого насыщенного и перегретого пара устанавливаются по формулам или по специальным таблицам, со-

ставленным на основании теоретических и экспериментальных исследований.

**Таблицы термодинамических свойств воды и водяного пара** содержат три таблицы [7]: термодинамические свойства воды и водяного пара в состоянии насыщения по температурам и по давлениям и термодинамические свойства воды и перегретого пара.

В приложении приведены таблицы термодинамических свойств воды и водяного пара.

В табл. П.1 и П.2 приводятся значения удельного объема, энтальпии и энтропии воды, нагретой до состояния кипения, и сухого насыщенного пара, температуры кипения, давления, при котором происходит парообразование, теплоты парообразования, параметры критического состояния.

В табл. П.3 приведены удельный объем, энтальпия и энтропия воды и перегретого пара при различных давлениях и температурах.

Таблицы дают лишь дискретные значения искомых величин. Для изображения непрерывных изменений параметров (процессов) на практике часто используется плоская система координат (диаграмма водяного пара).

**Диаграмма  $p, v$  водяного пара** приведена на рис. 1.3. На диаграмме нанесены три линии:

$A_0A'$  – линия холодной воды. На диаграмме она изображается в виде прямой линии, параллельной оси ординат, так как вода практически несжимаема. Эта линия будет и изотермой  $0^\circ\text{C}$ ;

$A'K$  – линия кипящей воды (левая пограничная кривая);

$KA''$  – линия сухого насыщенного пара (правая пограничная кривая).

Графическим изображением процесса нагрева воды, парообразования и перегрева пара при постоянном давлении будет линия  $a_0a'a''a$  (рис. 1.3) с четырьмя точками:  $a_0$  – холодная вода при  $0^\circ\text{C}$ ; точка  $a'$  – кипящая вода (начало процесса парообразования); точка  $a''$  – сухой насыщенный пар (окончание процесса парообразования); точка  $a$  – перегретый пар.

Отрезок  $a_0a'$  на прямой  $a_0a'a''a$  изображает в  $p-v$ -диаграмме процесс нагрева воды до кипения, отрезок  $a'a''$  – парообразование; отрезок  $a''a$  – перегрев пара.

По мере увеличения давления расстояние между пограничными кривыми уменьшается и, наконец, кривые сходятся в критической

точке К. В этом состоянии исчезает различие в свойствах пара и воды. Для воды параметры критического состояния:  $p_{KP} = 22,115$  МПа;  $t_{KP} = 374,12$  °С;  $\nu_{KP} = 0,003147$  м<sup>3</sup>/кг; удельная энтальпия  $h_{KP} = 2095,2$  кДж/кг; удельная энтропия  $s_{KP} = 4,4237$  кДж/(кг·К). При температурах выше критической  $t_{KP}$  возможно сосуществование только перегретого пара.

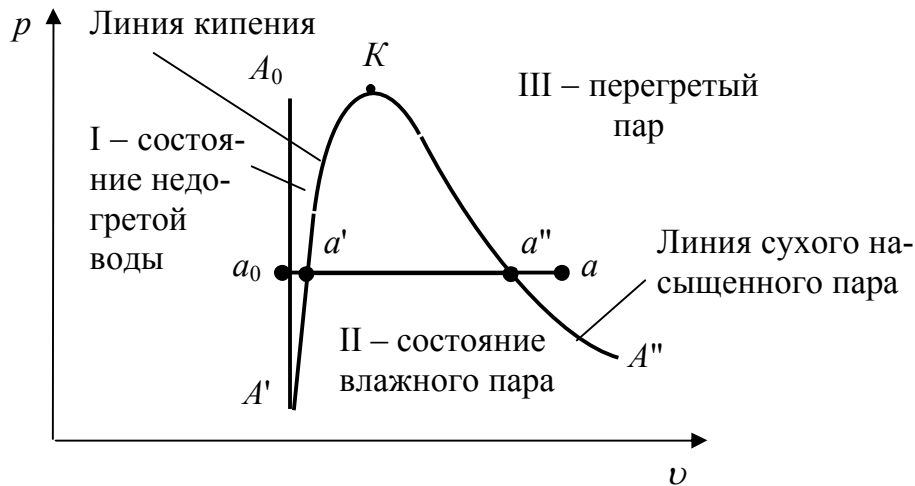


Рис. 1.3. Диаграмма  $p, \nu$  водяного пара

Точка  $A'$  пересечения линии кипящей жидкости и линии холодной воды соответствует состоянию кипящей жидкости в тройной точке. В этой точке могут находиться в равновесии все три фазы воды: лед, вода и пар. Параметры тройной точки для воды:  $p_0 = 0,61$  кПа;  $t_0 = 0,01$  °С;  $\nu_0 = 0,001$  м<sup>3</sup>/кг.

Линии холодной и кипящей воды и сухого насыщенного пара разбивают поле диаграммы на три области:

- область I, расположенная между линиями  $A_0A'$  и  $A'K$ , характеризует состояние подогретой воды;
- область II, ограниченная линиями  $A'K$  и  $KA''$ , – равновесное состояние воды и влажного насыщенного пара с различными степенями сухости (двухфазное состояние);
- область III, находится правее кривой  $KA''$ , – перегретый пар.

Количество теплоты, которое нужно сообщить воде, чтобы нагреть ее от  $t_0 = 0$  °С до температуры кипения в процессе  $p = \text{const}$ , называется *теплотой жидкости*, и определяется по формуле

$$q' = c_{PB}(t_H - t_0),$$

где  $c_{PB}$  – средняя теплоемкость воды в интервале температур от  $0$  °С до  $t_H$  °С.

При низких по сравнению с  $T_{KP}$  температурах можно считать  $c_{PB} = 4,1865$  кДж/(кг·К).

Параметры влажного насыщенного пара при заданной величине сухости могут быть определены из следующих соотношений.

Удельный объем влажного насыщенного пара

$$v = (1 - x)v' + xv''.$$

Так как объем воды  $(1 - x)v'$  мал по сравнению с объемом пара, то при невысоких давлениях

$$v = xv''.$$

Энтальпию влажного насыщенного пара с учетом того, что на превращение в пар  $x$  кг жидкости необходимо затратить  $xr$  кДж/кг теплоты, можно определить по формулам:

$$h = h' + xr, \quad h = h''x + h'(1 - x).$$

Скрытая теплота парообразования, кДж/кг,

$$r = h'' - h'.$$

Удельная энтропия влажного насыщенного пара, кДж/(кг·К),

$$s = s''x + s'(1 - x).$$

Перегретый пар характеризуется тем, что его температура выше температуры парообразования  $T_H$  при том же давлении и удельный объем его больше, чем сухого насыщенного пара при том же давлении.

Количество теплоты, необходимое для перевода 1 кг сухого насыщенного пара при  $p = \text{const}$  в перегретый с температурой  $t$ , называют *теплотой перегрева*  $q_{II}$  и определяют по формуле

$$q_{II} = \int_{T_H}^T c_p dT.$$

Если  $c_{Pm}$  – средняя массовая теплоемкость перегретого пара при постоянном давлении, то

$$q_{II} = c_{pm}(T - T_H).$$

Энтальпия перегретого пара

$$h_{II} = h'' + q_{II} = h' + r + c_{pm}(T - T_H)$$

называется *полной теплотой перегретого пара*.

**Диаграмма  $T, s$  водяного пара.** Для графического изображения процессов, происходящих в паре, удобно пользоваться  $T-s$ -диаграммой (рис. 1.4). Площадь под кривой обратимого процесса определяет количество теплоты, сообщаемое рабочему веществу или отнимаемое от него.

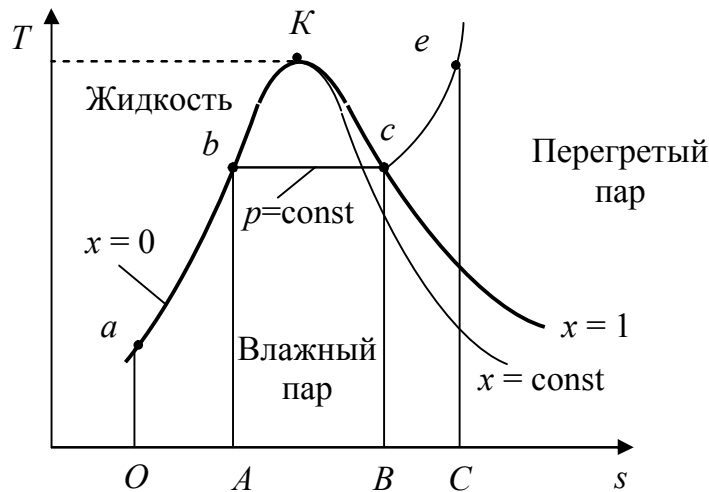


Рис. 1.4.  $T-s$ -диаграмма водяного пара

Область, лежащая между линией кипящей жидкости ( $aK$ ) и линией сухого насыщенного пара ( $cK$ ), это область влажного насыщенного пара. Область, лежащая правее линии  $cK$ , – область перегретого пара.

Так как процесс парообразования идет при  $T_H = \text{const}$  и  $p = \text{const}$ , изотерма  $b-c$  является одновременно и изобарой. Дальнейший подвод теплоты снова сопровождается увеличением температуры и энтропии – процесс перегрева пара (кривая  $ce$ ).

Теплота, подведенная к жидкости в процессе нагрева до состояния кипения, пропорциональна площади  $abAO$ . Площадь  $bcBA$  пропорциональна теплоте, подводимой к воде в процессе парообразования; площадь  $ceCB$  – теплоте, затраченной на перегрев пара.

**Диаграмма  $h, s$  водяного пара.** Для изучения и расчетов различных термодинамических процессов, в котором рабочим веществом

является насыщенным и перегретый пар, удобно пользоваться  $h$ - $s$ -диаграммой (рис. 1.5). На диаграмме линии кипящей жидкости и сухого насыщенного пара сливаются в критической точке  $K$ . В этой диаграмме теплота жидкостей, парообразования и перегрева изображается линейными отрезками, а не площадями. Теплота парообразования по данной изобаре

$$r = h'' - h'$$

равна разности ординат точек пересечения изобары с пограничными кривыми.

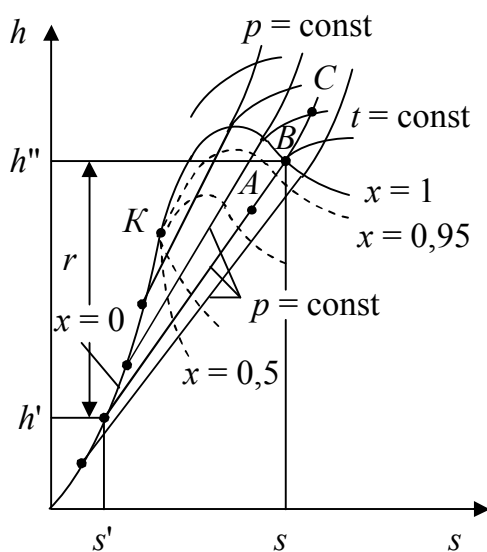


Рис. 1.5.  $h$ - $s$ -диаграмма водяного пара

В области влажного пара изобары, являясь одновременно и изотермами, представляют собой прямые линии. Изобары пересекают пограничные кривые без излома.

Изобары в области перегретого пара слабо вогнутые логарифмические кривые, изотермы – выпуклые кривые, поднимающиеся слева вверх направо. Чем больше температура, тем выше располагается изотерма. Чем дальше от пограничной кривой ( $x = 1$ ) проходит изотерма, тем больше она приближается к горизонтали  $h = \text{const}$ , так как в области идеального газа энтальпия однозначно определяется температурой.

На рис. 1.5 точки  $A$ ,  $B$ ,  $C$  изображают соответственно состояние влажного, сухого и перегретого пара.

#### 1.1.4. Основные термодинамические процессы водяного пара

В основные задачи анализа термодинамических процессов водяного пара входят нахождение начальных и конечных параметров и функций состояния, определение величин, входящих в уравнение первого закона термодинамики, построение графического изображения процессов в диаграммах.

**Изохорный процесс** ( $v = \text{const}$ ) 1–2, протекающий целиком в области насыщения, и 3–4, заканчивающийся в зоне перегрева, представлены на рис. 1.6.

Процессы 1–2 и 3–4 протекают в одинаковом интервале давлений  $p_1$  и  $p_2$ . Конфигурация изохор в  $T$ - $s$ - и  $h$ - $s$ -диаграммах определяется значениями степени сухости в зависимости от давления в области насыщения и значениями давления в зависимости от температуры в области перегрева.

Изохорные процессы наблюдаются в барабанах паровых котлов и теплообменниках при нагревании или охлаждении заполняющего их теплоносителя, если оборудование отключено от внешних коммуникаций.

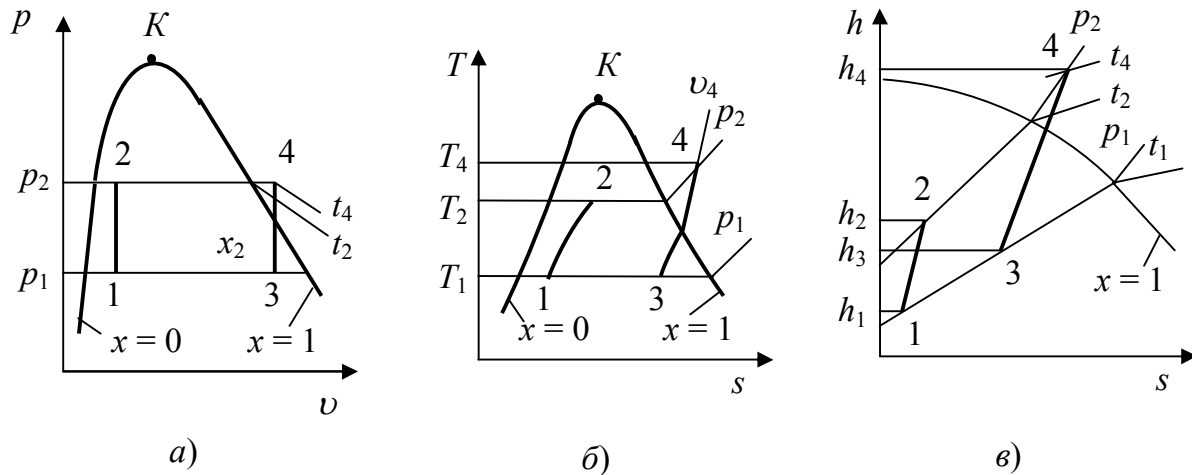


Рис. 1.6. Изохорные процессы для водяного пара:  
 а –  $p$ - $v$ -диаграмма, б –  $T$ - $s$ -диаграмма; в –  $h$ - $s$ -диаграмма

Для термодинамических процессов, протекающих в области насыщенного пара, значение энтальпий пара могут быть найдены на  $h$ - $s$ -диаграмме или по формуле

$$h_x = h' + rx, \quad (1.1)$$

где  $h'$  – энтальпия воды;  $r$  – скрытая теплота парообразования;  $x$  – степень сухости пара.

В процессах, осуществляемых перегретым паром, его энтальпия находится по  $h$ - $s$ -диаграмме или по таблицам термодинамических свойств воды и водяного пара.

**Изобарный процесс** ( $p = \text{const}$ ) для водяного пара является одним из основных процессов, протекающих в котлах электростанций, а также в различных теплообменных аппаратах.

Примеры изобарных процессов, протекающих полностью в области насыщения либо заканчивающихся в зоне перегретого пара, изображены в диаграммах на рис. 1.7 линиями 1–2 и 3–4.

Теплота, участвующая в изобарных процессах 1–2 и 3–4, может быть определена по  $T$ – $s$ -диаграмме как площадь под кривой процесса или по формулам:

$$q_{1-2} = h_2 - h_1; \quad q_{3-4} = h_4 - h_3.$$

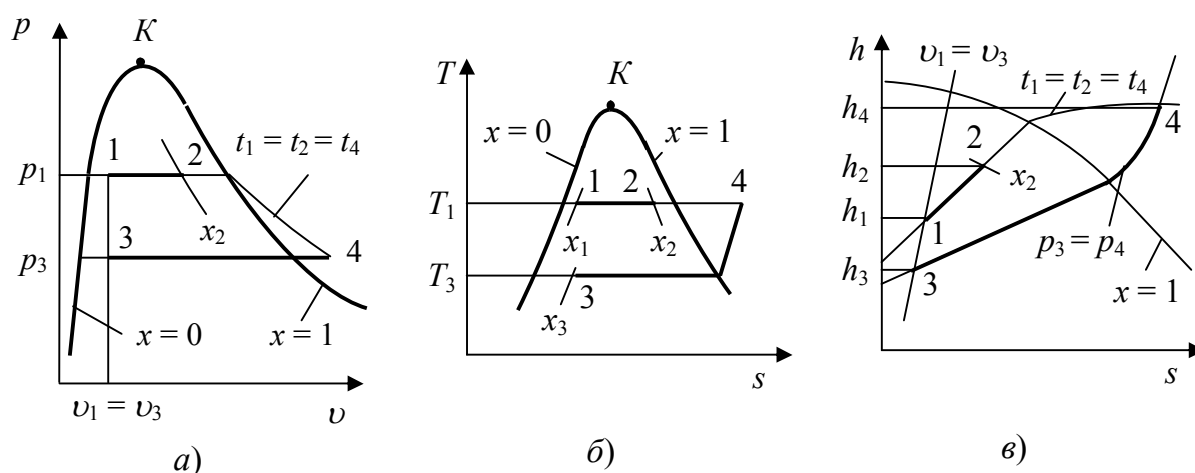


Рис. 1.7. Изобарные процессы для водяного пара:  
а –  $p$ – $v$ -диаграмма, б –  $T$ – $s$ -диаграмма; в –  $h$ – $s$ -диаграмма

Энтальпии пара в зависимости от его состояния находятся по  $h$ – $s$ -диаграмме, таблицам термодинамических свойств воды и водяного пара или формуле (1.1).

Удельные объемы влажного пара находятся по  $h$ – $s$ -диаграмме или формуле

$$v_x = (1 - x)v' + xv'',$$

где значения удельных объемов пара на пограничных кривых  $v'$ ,  $v''$  принимаются по таблицам термодинамических свойств воды и водяного пара.

Удельные объемы перегретого пара определяются по таблицам термодинамических свойств воды и водяного пара или  $h$ – $s$ -диаграмме.

**Изотермический процесс** ( $T = \text{const}$ ), происходящий полностью в области насыщенного пара, совпадает с изобарным процессом в зоне насыщения. Изотермический процесс, начинающийся в области насыщения и заканчивающийся в зоне перегрева, изображен в диаграммах на рис. 1.8 линией 1-2.

Количество теплоты, участвующее в изотермическом процессе 1-2, может быть найдено графически, как площадь под кривой в  $T$ - $s$ -диаграмме или по выражению

$$q_{1-2} = T(s_2 - s_1).$$

Энтропия влажного пара определяется по  $h$ - $s$ -диаграмме или формуле

$$s_x = s' + rx/T_s,$$

где  $s'$  – энтропия кипящей воды;  $T_s$  – температура насыщенного пара при данном давлении.

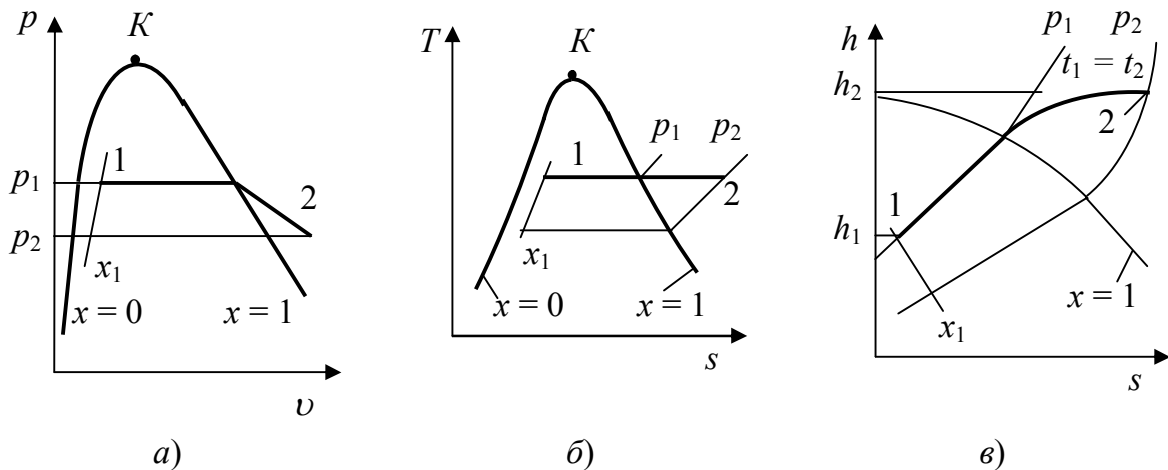


Рис. 1.8. Изотермические процессы для водяного пара: а –  $p$ - $v$ -диаграмма, б –  $T$ - $s$ -диаграмма; в –  $h$ - $s$ -диаграмма

Энтропия перегретого пара находится по  $h$ - $s$ -диаграмме или по таблицам термодинамических свойств воды и водяного пара.

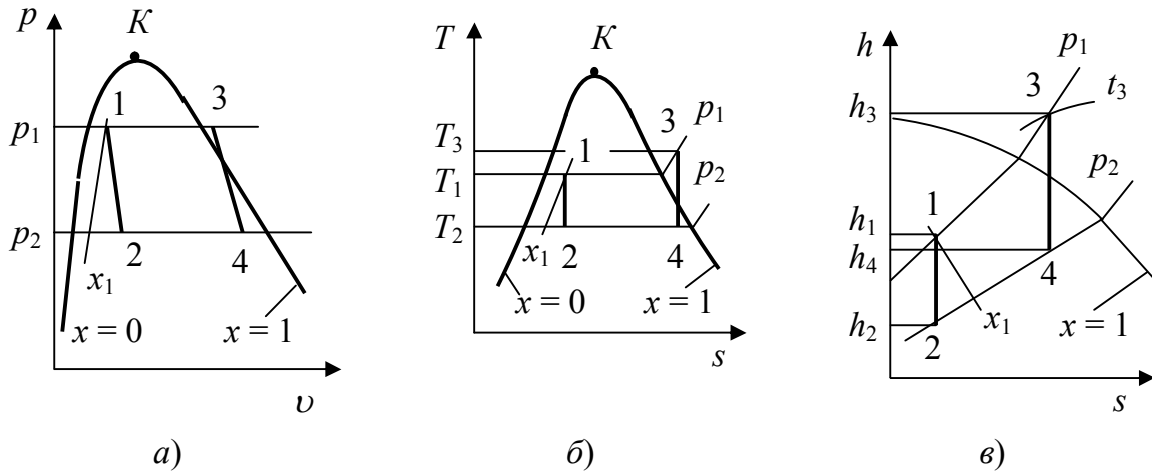
**Адиабатный процесс** ( $dq = 0$ ). Примеры изображения адиабатных процессов водяного пара в диаграммах приведены на рис. 1.9.

Адиабата 1-2 полностью расположена в области влажного пара, а адиабата 3-4 начинается в области перегретого пара и заканчивается в зоне насыщения.

Уравнение адиабаты водяного пара описывается зависимостью

$$pV^{\kappa} = \text{const},$$

где  $\kappa$  – показатель адиабаты ( $\kappa = 1,135$  – влажный насыщенный пар,  $\kappa = 1,3$  – перегретый пар).



а) б) в)  
Рис. 1.9. Адиабатные процессы для водяного пара:  
а –  $p$ - $v$ -диаграмма, б –  $T$ - $s$ -диаграмма; в –  $h$ - $s$ -диаграмма

Работа адиабатного процесса равна

$$l_{1-2} = h_1 - h_2; \quad l_{3-4} = h_3 - h_4.$$

## 1.2. Определение параметров воды и водяного пара по таблицам

Водяной пар, широко используемый в теплотехнике в качестве рабочего вещества, относится к реальным газам. В реальных газах, в отличие от идеальных, заметно влияние сил взаимодействия между молекулами. Известные уравнения состояния для водяного пара и для воды достаточно сложны, что инженерами непосредственно не используются, а в практике инженерных теплотехнических расчетов применяются таблицы и диаграммы воды и водяного пара, составленные по этим уравнениям.

Выполнение настоящей работы позволит студентам научиться определять по таблицам воды и водяного пара их термодинамические параметры.

### 1.2.1. Цель и задачи работы

Целью работы является ознакомление студентов с методикой определения параметров воды и водяного пара (реального газа) по таблицам. При этом решаются следующие задачи:

- а) изучаются термодинамические таблицы воды и водяного пара;
- б) определяются параметры реального газа;
- в) строится по найденным параметрам  $T-s$ -диаграмма.

### 1.2.2. Проведение работы

Используя таблицы термодинамических свойств воды и водяного пара [7] и приложение, требуется определить параметры воды и водяного пара при заданных давлениях  $p_1$  и  $p_2$  (табл. 1.1) и построить в масштабе  $T-s$ -диаграмму (рис. 1.10). Нанести на диаграмму критическую точку  $K$ ; линии кипящей воды  $x = 0$ , сухого насыщенного пара  $x = 1$ , постоянных давлениях  $p_1$  и  $p_2$  и линию постоянной степени сухости  $x = \text{const}$ .

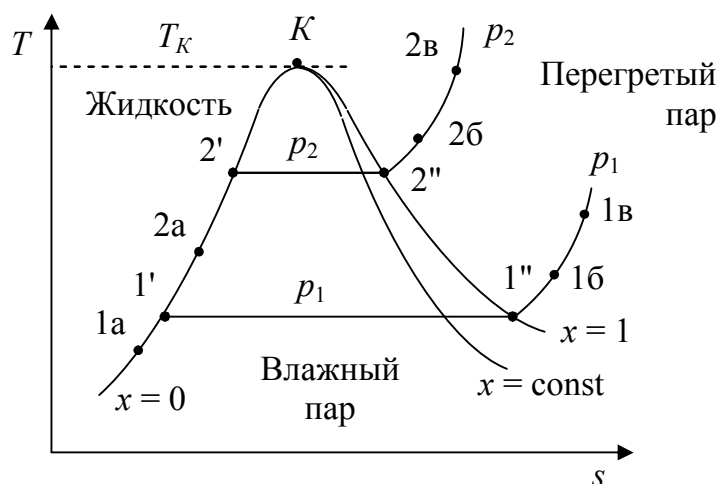


Рис. 1.10.  $T-s$ -диаграмма воды и водяного пара:  $x = 0$  – линия кипящей жидкости;  $x = 1$  – линия сухого насыщенного пара;  $K$  – критическая точка;  $x$  – степень сухости пара

Таблица 1.1

**Исходные данные к построению  $T-s$ -диаграммы**  
(значения  $p_1$  и  $p_2$  даны в МПа;  $x$  – безразмерная величина)

Исх. дан.	Варианты									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$p_1$	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,02
$p_2$	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0
$x$	0,6	0,4	0,5	0,7	0,9	0,8	0,3	0,4	0,6	0,8
Исх. дан.	Варианты									
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$p_1$	0,03	0,04	0,06	0,08	0,05	0,02	0,01	0,07	0,03	0,09
$p_2$	5,6	6,0	6,6	7,0	7,6	8,0	8,6	9,0	9,6	10
$x$	0,3	0,7	0,5	0,4	0,8	0,9	0,3	0,6	0,2	0,7

Построение диаграммы  $T-s$  начинают с осей ординат и абсцисс (температуры  $T$  и удельной энтропии  $s$ ). Температура в критической точке равна  $T_{кр} = 374,15$  °С, а энтропия в этой точке равна  $s_{кр} = 4,4237$  кДж/(кг·К). Поэтому на оси ординат следует отложить температуру от 0 до 500 °С. Удобнее для дальнейшего построения диаграммы на каждые 100 °С оставить 5 клеток тетрадного листа. По оси абсцисс следует отложить значения энтропии  $s$  от 0 до 10 кДж/(кг·К). Удобнее для дальнейшего построения диаграммы на каждую единицу энтропии оставить 2 клетки тетрадного листа.

По значениям  $T_{кр}$  и  $s_{кр}$  наносится критическая точка  $K$ . Затем строятся нижняя пограничная кривая (линия кипящей жидкости  $x = 0$ ) и верхняя пограничная кривая (линия сухого насыщенного пара  $x = 1$ ). Для этого по термодинамическим таблицам воды и водяного пара по известным давлениям определяют температуру и энтропию в точках 1', 1'', 2', 2''. Все определенные по таблицам параметры заносятся в отчет по форме табл. 2 без округлений из значений. Линии 1'-1'' и 2'-2'' являются изобарно-изотермическими процессами.

При определении параметров воды в точках 1а и 2а необходимо задать температуры воды ниже температуры насыщения, а при определении параметров перегретого пара в точках 1б, 1в, 2б и 2в необходимо задать температуры выше (на 100–200 °С) температуры насыщения при заданных давлениях  $p_1$  и  $p_2$  и по ним и табл. П.3 определить требуемые параметры. Параметры в критической точке  $K$  приведены в настоящем учебно-методическом пособии и в [7].

Таблица 1.2

**Параметры воды и водяного пара, найденные по таблицам**

Точки	$p$ , МПа	$t$ , °С	$v$ , м <sup>3</sup> /кг	$h$ , кДж/кг	$s$ , кДж/(кг·К)	$x$
К						
1'						
1''						
1а						
1б						
1в						
2'						
2''						
2а						
2б						
2в						

Построение  $T-s$ -диаграммы выполняется в масштабе путем нанесения соответствующих точек и соединения их, как показано на рис. 1. Для нанесения линии постоянной степени сухости  $x = \text{const}$  необходимо линии постоянных давлений в области влажного пара 1'-1'' и 2'-2'' разбить каждую на 10 равных отрезков. Каждый отрезок будет соответствовать  $0,1x$ , и затем надо от линии  $x = 0$  отложить требуемое число отрезков в соответствии с заданным  $x$ . Полученные точки необходимо соединить линией, исходящей из критической точки.

### **Контрольные вопросы**

1. Покажите, как изображается в  $T-s$ -диаграмме энтальпия кипящей воды, сухого насыщенного пара и перегретого пара.
2. Как при помощи таблиц водяного пара можно определить, в каком состоянии находится вода, если известны ее параметры?»?
3. Как могут быть вычислены параметры в области влажного пара?
4. Приведите определения следующих процессов и понятий: парообразование, конденсация, испарение, кипение, влажный и сухой насыщенный пар, перегретый пар.
5. За счет чего происходит изменение в изотермическом процессе водяного пара и как его подсчитать при заданных начальных и конечных параметрах  $p, v, h$ .
6. Как могут быть графически построены линии постоянной сухости в  $p-v$ ,  $T-s$ - и  $h-s$ -диаграммах?
7. Покажите с помощью  $T-s$ -диаграммы, как будет меняться влажность пара в адиабатных процессах сжатия, если в первом случае процесс протекает при значении энтропии меньше критического, а во втором – больше критического.
8. Изобразите на диаграммах  $p-v$ ,  $T-s$  и  $h-s$  изохорный и изотермический процессы превращения влажного насыщенного водяного пара в перегретый. Дайте краткие пояснения.
9. Изобразите  $p-v$ -диаграмму для воды и перегретого пара и покажите, как в этой диаграмме изображаются характерные линии. Поясните, на какие области можно разделить  $p-v$ -диаграмму. Какие состояния откладываются на нижней и верхней пограничных кривых? Что такое степень сухости и влажность пара?

### 1.3. Паросиловые установки

#### 1.3.1. Цикл паросиловой установки – цикл Ренкина

Паросиловая установка (рис. 1.11, а) работает следующим образом. Питательная вода из резервуара 1 насосом 2 подается в экономайзер 3, где происходит ее подогрев уходящими из парового котла 4 газами.

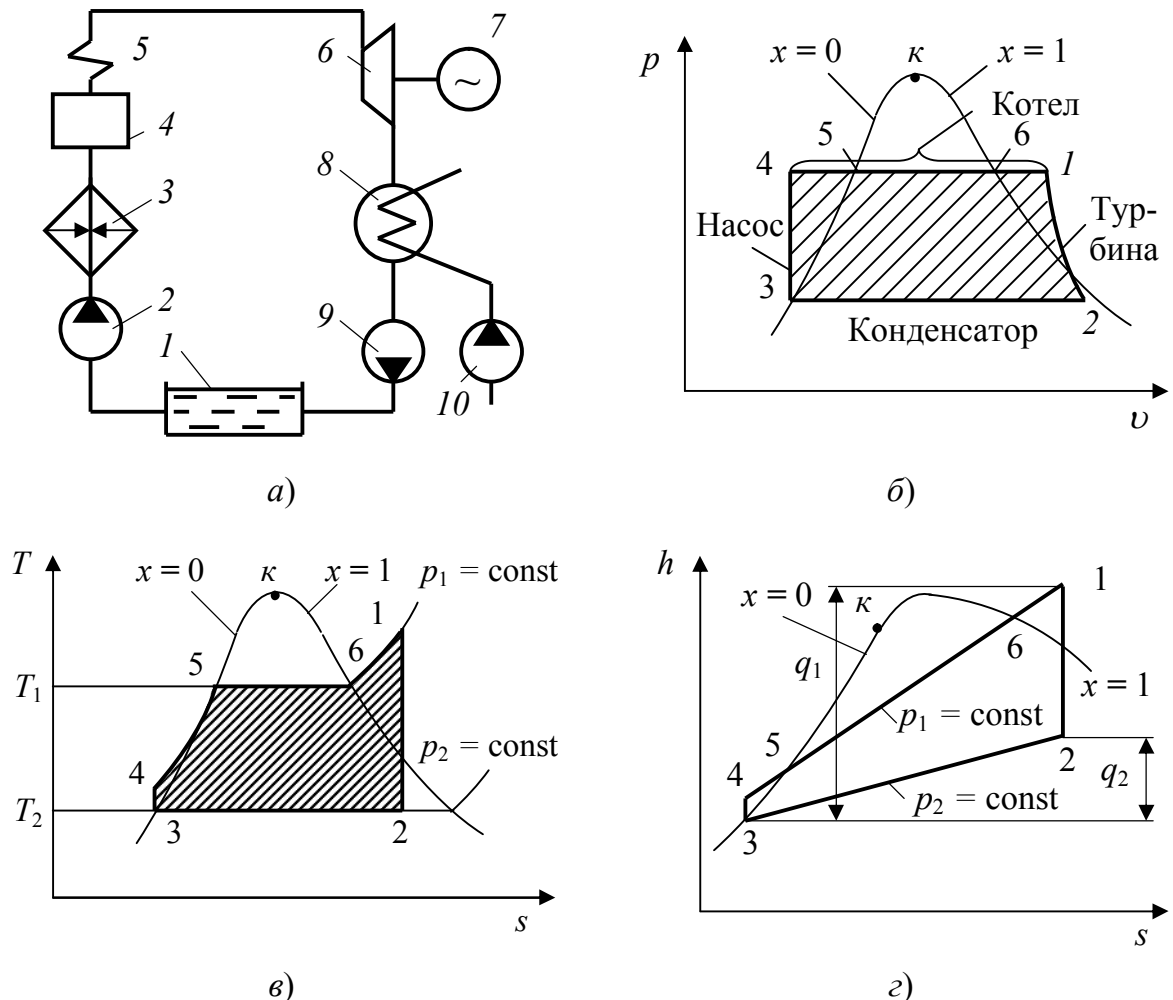


Рис. 1.11. Теоретический цикл паросиловой установки – цикл Ренкина: а – принципиальная схема установки; б - г – теоретические циклы в диаграммах: 1 – резервуар питательной воды; 2 – насос питательной воды; 3 – экономайзер; 4 – паровой котел; 5 – пароперегреватель; 6 – паровая турбина; 7 – электрогенератор; 8 – конденсатор; 9 – насос конденсатный; 10 – насос охлаждающей воды

В котле-парогенераторе происходит парообразование, затем отсепарированный с небольшой влажностью пар поступает в пароперегреватель 5, откуда перегретый пар подается к паровой турбине 6 (поршневые паровые машины уже почти не применяются). Работа

расширения в турбине используется для привода генератора 7 электрического тока и частично на работу насосов.

Отработавший в турбине пар охлаждается в конденсаторе 8, превращается в жидкую воду – конденсат, подаваемый насосом 9 в резервуар питательной воды 1. Насос 10 предназначен для подачи охлаждающей воды.

Теоретический цикл такой установки с турбиной называется *циклом Ренкина*, а с поршневой расширительной машиной (поршневой машиной) – *циклом Майера*.

Рассмотрим цикл Ренкина в термодинамических диаграммах  $p-v$  (рис. 1.11, б),  $T-s$  (рис. 11, в) и  $h-s$  (рис. 1.11, г).

Процесс 3-4 – подача воды насосом в котел; 4-5 – подогрев воды в котле до кипения; 5-6 – образование пара в котле; 6-1 – перегрев насыщенного пара в пароперегревателе; 1-2 – расширение перегретого пара в турбине (совершение работы); 2-3 – конденсация пара.

Количество теплоты, подаваемой в изобарном процессе 4-5-6-1 нагрева воды, парообразования и перегрева

$$q_1 = h_1 - h_3,$$

где  $h_3$  – энтальпия конденсата, подаваемого в котел.

Количество теплоты, отводимой в изобарном процессе 2-3 конденсации пара,

$$q_2 = h_2 - h_3.$$

Полезная работа, совершаемая в турбине,

$$l = q_1 - q_2 = (h_1 - h_3) - (h_2 - h_3) = h_1 - h_2.$$

Термический КПД цикла Ренкина

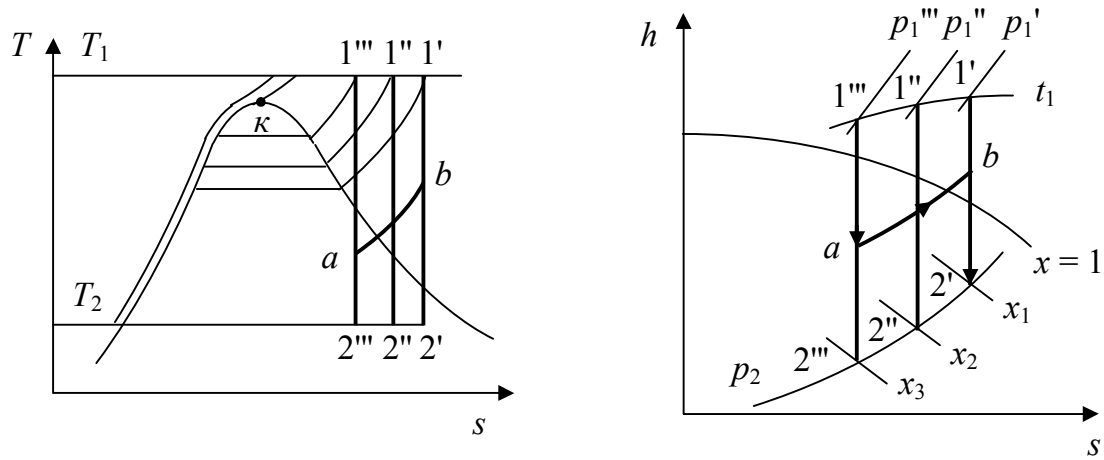
$$\eta_t = \frac{l}{q_1} = \frac{q_1 - q_2}{q_1} = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_3}. \quad (1.2)$$

КПД  $\eta_t$  увеличивается с увеличением  $h_1$  и уменьшением  $h_2$ , т.е. с увеличением начальных параметров пара  $p_1$  и  $t_1$  и уменьшением конечных  $p_2$  и  $t_2$  (рис. 1.12).

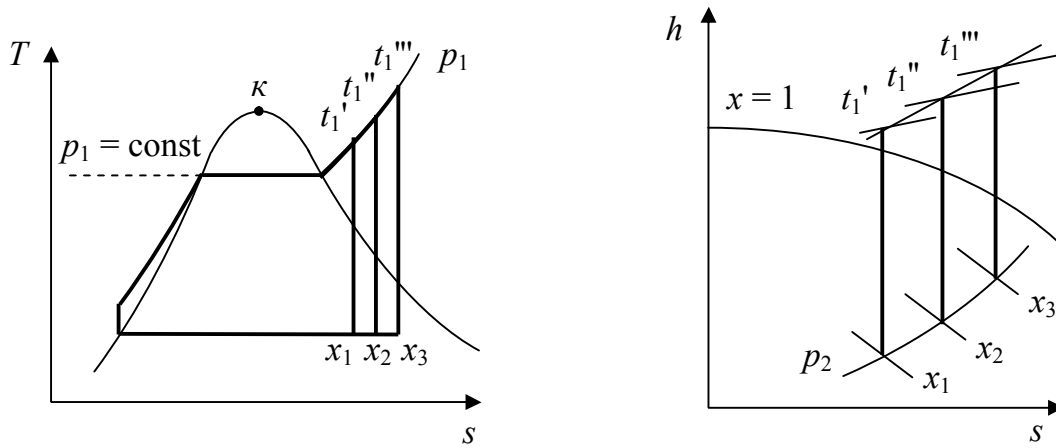
Конечные параметры пара связаны между собой, так как пар в этой области влажный.

Увеличение  $t_1$  ограничивается жаропрочностью материалов, увеличение  $p_1$  – допустимой степенью влажности пара в конце расшире-

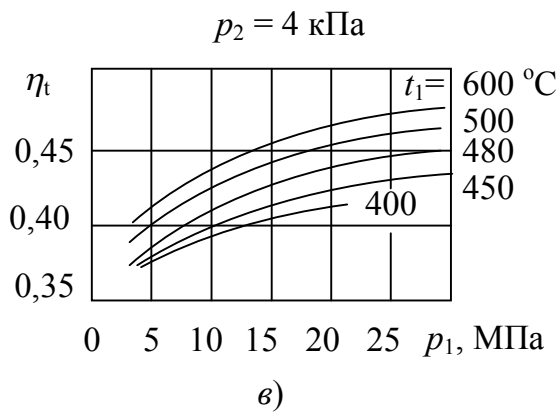
ния; повышенная влажность ( $x > 0,80-0,86$ ) приводит к эрозии деталей турбины.



a)



б)



в)

Рис. 1.12. Влияние повышения начальных давлений (а) и температуры (б) пара на экономичность цикла Ренкина (в)

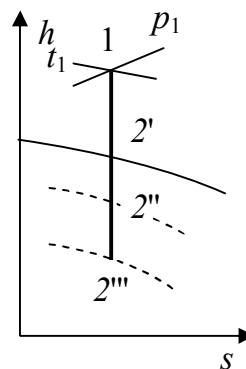
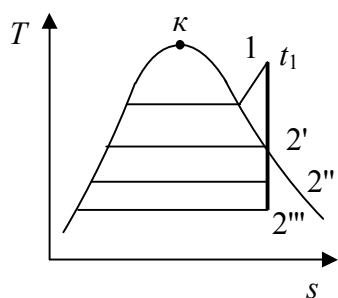
В настоящее время на электростанциях России в основном используются параметры пара  $p_1 = 23,5$  МПа и  $t_1 = 565$  °С. На опытных установках применяются и сверхкритические параметры  $p_1 = 29,4$  МПа и  $t_1 = 600-650$  °С.

Температурой охлаждающей воды  $t_0 = 0-25(30)$  °С.

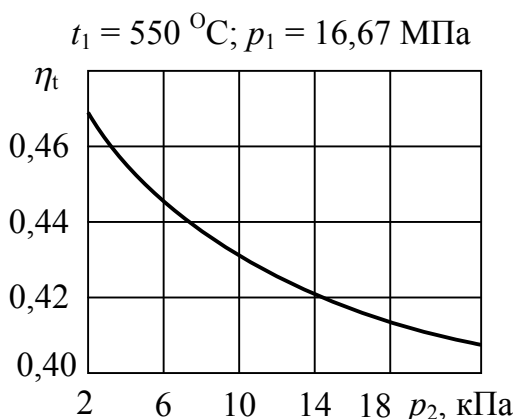
Этому соответствует температура насыщения  $t_2 = 26,2-28,6$  °С, а давление в конденсаторе –  $p_2 = 3,5-4$  кПа.

При малой разности  $t_2 - t_0$  интенсивность теплообмена падает, а размеры конденсатора растут. Кроме того, с понижением  $p_2$  становится все большим удельный объем пара, что ведет к увеличению размера конденсатора, а также последних ступеней турбины.

На рис. 1.12 и 1.13 показано влияние  $p_1$ ,  $t_1$  и  $p_2$  на термический КПД и степень сухости пара в конце расширения. Процесс 1'''-а-в-2' на рис. 12, а есть процесс расширения с одним промежуточным перегревом.



а)



б)

Рис. 1.13. Влияние понижения давления в конденсаторе на влажность пара в конце расширения (а) и экономичность цикла Ренкина (б)

Возможности повышения экономичности простейшего цикла паротурбинной установки – цикла Ренкина – исчерпаны почти полно-

стью. Другой путь – приближение его конфигурации к конфигурации цикла Карно за счет регенерации теплоты, промежуточного перегрева пара между ступенями турбины, применение бинарных циклов. Третий путь – комбинированная выработка механической энергии (преобразующейся на электростанциях в электричество) и теплоты для технологических нужд промышленности и отопления, осуществляемая на теплоэлектростанциях (ТЭЦ). В теплофикационных турбоустановках конденсатор исключается вообще или же давление в нем повышается до 30-60 МПа.

### 1.3.2. Цикл паротурбинной установки с регенерацией

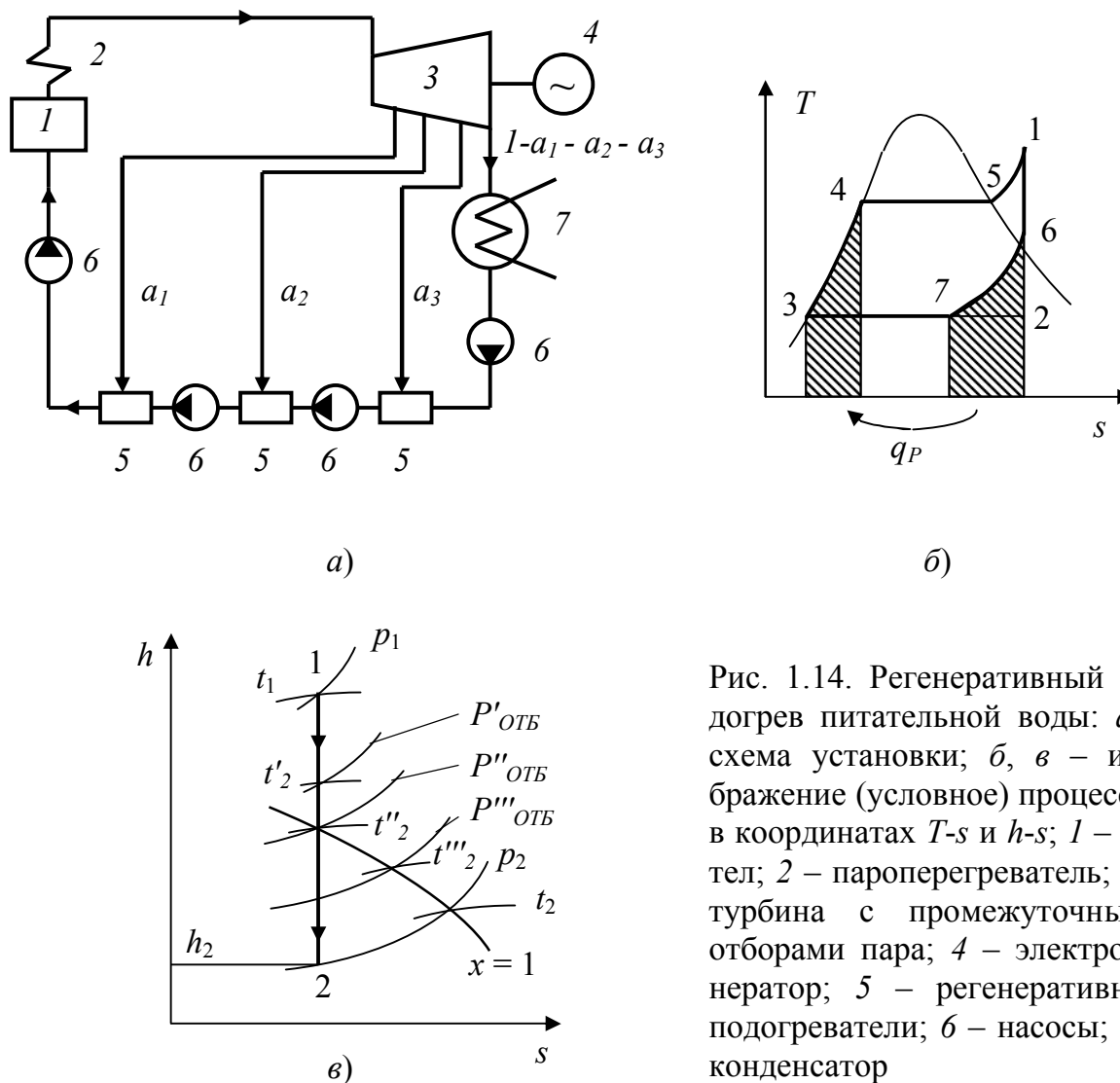


Рис. 1.14. Регенеративный подогрев питательной воды: а – схема установки; б, в – изображение (условное) процессов в координатах  $T-s$  и  $h-s$ ; 1 – котел; 2 – пароперегреватель; 3 – турбина с промежуточными отборами пара; 4 – электрогенератор; 5 – регенеративные подогреватели; б – насосы; 7 – конденсатор

Цикл ПТУ с регенерацией (рис. 1.14, а) осуществляется путем подогрева питательной воды перед котлом в регенераторе паром, отбираемым между ступенями турбины, т.е. полностью еще не расширившимся и не совершившим всей работы. На рис. 1.14, б условно изображен процесс регенеративного подогрева питательной воды.

Регенеративный подогрев позволяет, когда это желательно, исключить экономайзер (подогрева питательной воды уходящими газами), используя теплоту уходящих газов для подогрева поступающего в топку воздуха.

Увеличение КПД при применении регенерации составляет 10–15 %. При этом экономия теплоты в цикле возрастает с повышением начального давления  $p_1$  пара. В настоящее время регенеративный подогрев применяется на всех крупных паротурбинных электростанциях.

### **1.3.3. Цикл паротурбинной установки с промежуточным перегревом пара**

Цикл с промежуточным перегревом пара (рис. 1.15, а) позволяет:

- избежать повышенной влажности пара в конце расширения, которая снижает внутренний относительный КПД турбины и вызывает эрозию лопаток турбины;

- повысить КПД цикла  $\eta_t$  за счет приближения его по мере увеличения числа ступеней перегрева к циклу Карно.

Количество подведенной теплоты

$$q_1 = q'_1 + q''_2,$$

где  $q'_1 = h_1 - h'_2$  – теплота, подведенная в котле;  $h'_2$  – энтальпия конденсата, подаваемого в котел;  $q''_2 = h_b - h_a$  – теплота, подведенная в промежуточном перегревателе.

Количество теплоты, отводимой в изобарном процессе конденсации пара,

$$q_2 = h_2 - h'_2.$$

Термический КПД

$$\eta_t = \frac{q_1 - q_2}{q_1} = \frac{h_1 - h'_2 + h_b - h_a - h_2 + h'_2}{h_1 - h'_2 + h_b - h_a} = \frac{h_1 - h'_2 + h_b - h_a}{h_1 - h'_2 + h_b - h_a}.$$

Установлено, что один промежуточный перегрев приводит к повышению  $\eta_i$  на 2–3,5 %. Однако технические трудности ограничивают число промежуточного перегрева не более чем двумя-тремя.

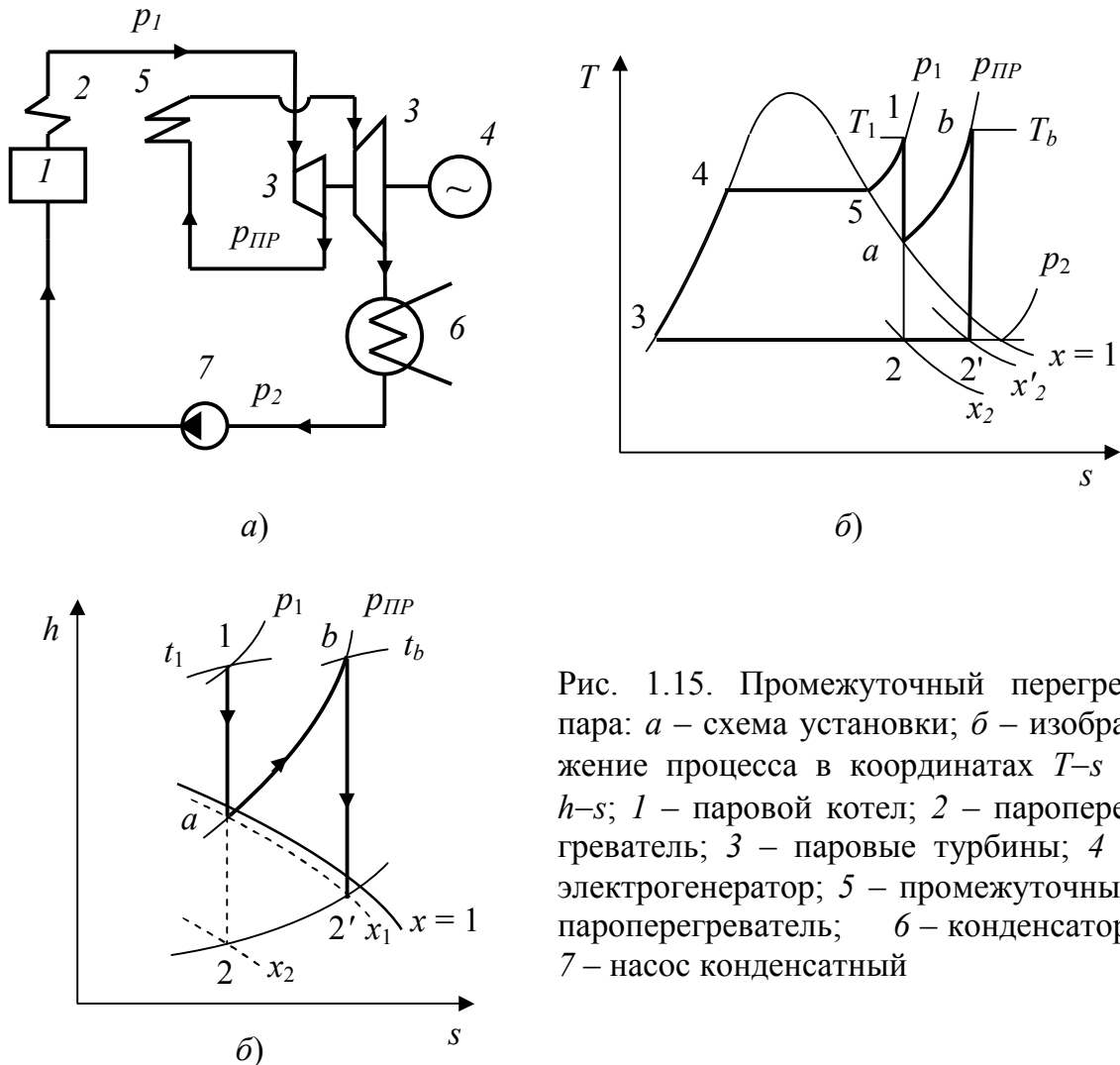


Рис. 1.15. Промежуточный перегрев пара: *а* – схема установки; *б* – изображение процесса в координатах  $T-s$  и  $h-s$ ; 1 – паровой котел; 2 – пароперегреватель; 3 – паровые турбины; 4 – электрогенератор; 5 – промежуточный пароперегреватель; 6 – конденсатор; 7 – насос конденсатный

### 1.3.4. Теплофикационный цикл паросиловой установки

В паросиловом цикле, представленном на рис. 1.11, *а*, площадь 1-2-3-4-5-6-1 (рис. 11, *б* и *в*) пропорциональна работе цикла. Площадь под линией процесса 2-3 в  $T-s$ -диаграмме (рис. 1.11, *в*) пропорциональна теплоте, отведенной от пара при его конденсации в конденсаторе.

В обозначениях цикла паросиловой установки, представленного на рис. 1.16, *а*, пл. 1-2-3-4-5-1 ~ работе цикла, а пл. 2-3-8-10 ~ теплоте, отведенной в конденсаторе при  $t_0 = 20^\circ\text{C}$ .

В теплофикационном цикле паротурбинной установки производство механической работы уменьшено на величину, пропорциональную пл. 6-2-3-7-6, с целью увеличения количества теплоты пропорциональной площади 6-10-9-7-6, отводимой при  $t_0 = 150-200$  °С на удовлетворение нужд промышленности, отопления и т.п.

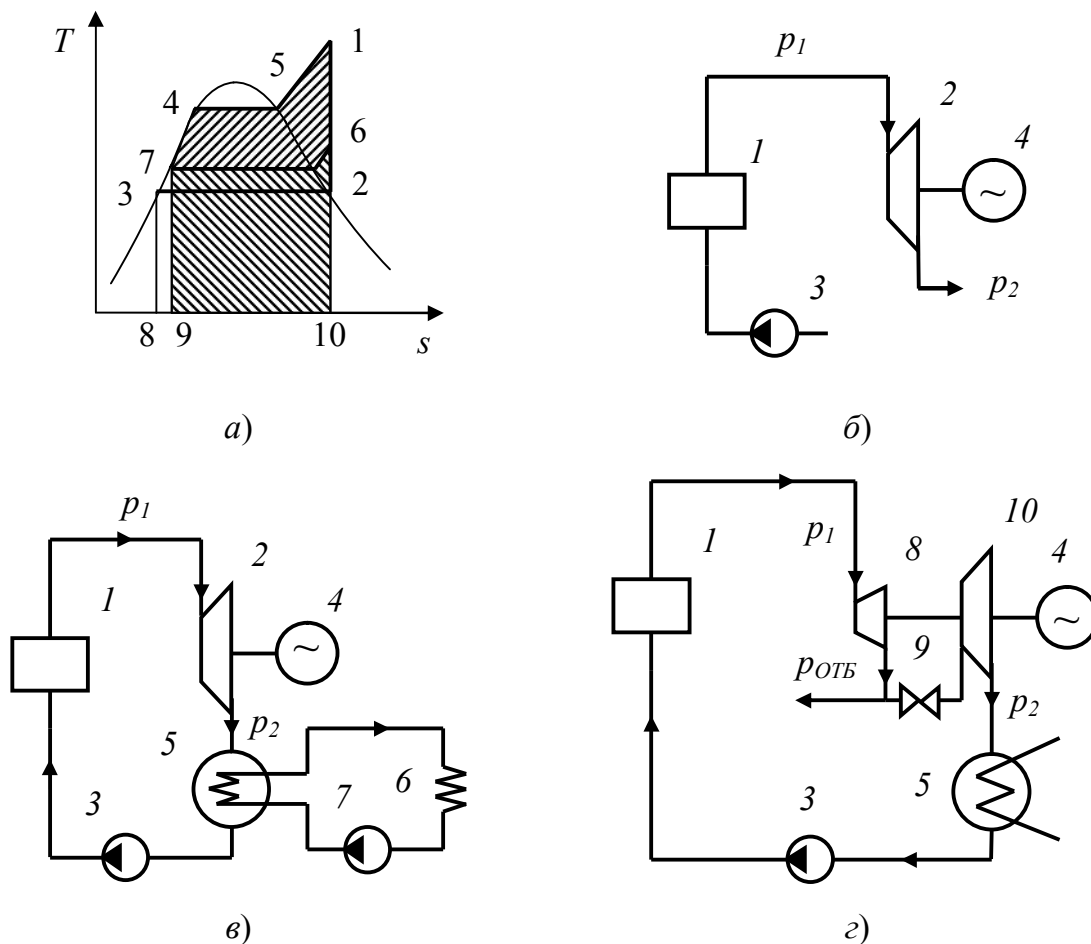


Рис. 1.16. Теплофикационный цикл (а) и три типа установок: с противодавлением (б), с ухудшенным вакуумом (в) и с регулируемыми отборами пара (г); 1 – паровой котел; 2 – паровая турбина; 3 – питательный насос; 4 – электрогенератор; 5 – конденсатор; 6 – потребитель теплоты; 7 – сетевой насос; 8 – турбина высокого давления; 9 – регулятор количества отбираемого пара; 10 – турбина низкого давления

В теплофикационных установках используются турбины трех типов:

- с противодавлением,  $p_2 = 0,12-1,2$  МПа (рис. 1.16, б);
- с ухудшенным вакуумом,  $p_2 = 0,05-0,09$  МПа (рис. 1.16, в);
- с регулируемыми отборами пара (рис. 1.16, г).

*Турбины с противодавлением* относительно просты, малогабаритны и дешевы, но применяются они мало, поскольку количество электроэнергии, вырабатываемое с их помощью, зависит не от электрических, а от тепловых потребителей, весьма нестабильных.

*Турбины с ухудшенным вакуумом* при отсутствии тепловых потребителей могут работать с расширением пара до глубокого вакуума, как конденсационные, но выработка электроэнергии у них тоже зависит расхода теплоты.

*Турбины с регулируемыи отборами* не имеют отмеченных недостатков, позволяя свободно изменять электрическую и тепловую нагрузку, т.е. работать по свободному графику. Они в основном применяются на ТЭЦ. На рис. 1.16, *г* приведена схема такой установки с одним регулируемым, в зависимости от потребителей в электроэнергии и теплоте, отбором пара  $p_{OTB}$ . Давление устанавливается с помощью клапана 9, расположенного на магистрали между ступенями турбины высокого  $\delta$  и низкого  $10$  давления.

Критерий эффективности теплофикационного цикла называют в отличие от КПД *коэффициентом использования теплоты*. Он определяется отношением общего количества получаемой работы  $w$  и теплоты  $q_2$  к количеству затраченной теплоты  $q_1$ :

$$\eta_{и.т} = \frac{w + q_2}{q_1} = \frac{(h_1 - h_6) + (h_6 - h_{10})}{h_1 - h'_{10}}.$$

В идеальном случае  $\eta_{и.т} = 100\%$ , реально – 70–75 %.

#### **1.4. Газотурбинные установки**

Газотурбинные установки (ГТУ) относятся к числу двигателей внутреннего сгорания. Газ, получившийся в результате сгорания топлива в камере сгорания, направляется в турбину. Продукты сгорания, расширяясь в сопловом аппарате и частично на рабочих лопатках турбины, производят на колесе турбины механическую работу.

В основе работы ГТУ лежат идеальные циклы, состоящие из простейших термодинамических процессов. К числу возможных идеальных циклов ГТУ относятся:

- цикл с подводом теплоты при постоянном давлении  $p = \text{const}$ ;
- цикл с подводом теплоты при постоянном объеме  $v = \text{const}$ ;
- цикл с регенерацией теплоты.

Из перечисленных циклов наибольшее распространение получил цикл с подводом теплоты при  $p = \text{const}$ .

### 1.4.1. Цикл с подводом теплоты при $p = \text{const}$

Схема простейшей ГТУ со сгоранием топлива при постоянном давлении представлена на рис. 1.17. Компрессор К, приводимый в движение газовой турбиной ГТ, подает сжатый воздух в камеру сгорания КС, в которую впрыскивается топливо. Продукты сгорания расширяются в сопловом аппарате и частично на рабочих лопатках турбины и выбрасываются в атмосферу.

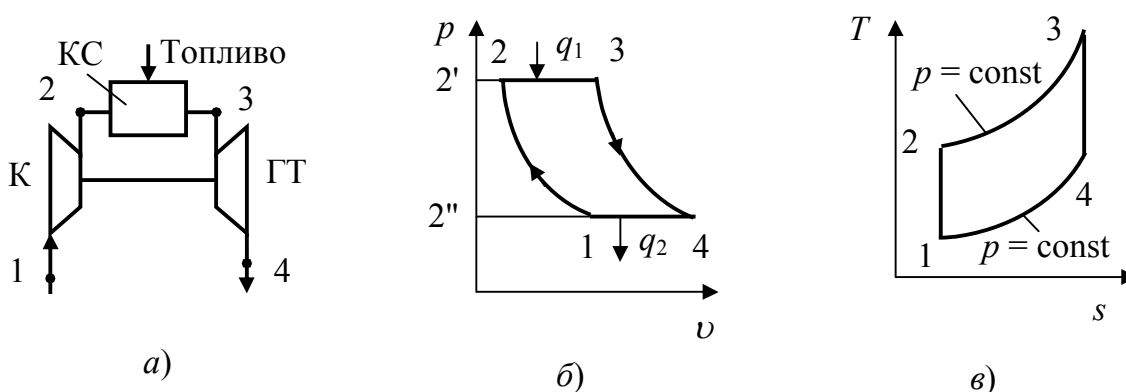


Рис. 1.17. Схема ГТУ с подводом теплоты при  $p = \text{const}$  (а) и цикл в диаграммах  $p-v$  (б) и  $T-s$  (в): К – компрессор; КС – камера сгорания; ГТ – газовая турбина

В термодинамических диаграммах  $p-v$  и  $T-s$  (см. рис. 1.17, б и в) цикл ГТУ 1-2-3-4-1. Работа цикла на  $p-v$ -диаграмме представляет собой разность площадей 2''-4-3-2' и 2''-1-2-2', соответственно равных работе турбины и компрессора.

В этих диаграммах: 1-2 – процесс адиабатного сжатия воздуха в компрессоре; 2-3 – подвод теплоты в камеру сгорания при  $p = \text{const}$ ; 3-4 – адиабатное расширение газа в турбине; 4-1 – изобарная отдача теплоты окружающему воздуху.

Параметрами цикла являются: степень повышения давления воздуха  $\pi$  и степень предварительного расширения  $\rho$ :

$$\pi = p_2/p_1, \quad \rho = v_3/v_2.$$

Термический КПД цикла определяется из выражения

$$\eta_t = 1 - \frac{q_2}{q_1},$$

где

$$q_1 = c_p(T_3 - T_2), \quad q_2 = c_p(T_4 - T_1).$$

Параметры газа в узловых точках цикла находятся по формулам, связывающим параметры газа в адиабатном и изобарном процессах:

$$\text{точка 2} \quad T_2 = T_1 \pi^{\frac{k-1}{k}}; \quad \text{точка 3} \quad T_3 = T_1 \pi^{\frac{k-1}{k}} \rho; \quad \text{точка 4} \quad T_4 = T_1 \rho.$$

Термический КПД цикла

$$\eta_t = 1 - \frac{T_1(\rho - 1)}{T_1 \pi^{\frac{k-1}{k}}(\rho - 1)}, \quad \eta_t = 1 - \frac{1}{\pi^{\frac{k-1}{k}}}. \quad (1.3)$$

Работа цикла равна

$$l_{ц} = q_1 \eta_t = c_p T_1 \pi^{\frac{k-1}{k}} (\rho - 1) \left( 1 - \frac{1}{\pi^{\frac{k-1}{k}}} \right).$$

Анализ выражения (1.3) показывает, что термический КПД ГТУ при данном рабочем веществе (данном  $k$ ) зависит от степени повышения давления в компрессоре, причем с ростом  $\pi$  термический КПД увеличивается. С другой стороны, повышение  $\pi$  приводит к увеличению температуры газов перед рабочими лопатками турбины. Значение этой температуры лимитируется жаропрочностью сплавов, из которых изготовлены лопатки. В настоящее время максимально допустимая температура газов перед турбиной составляет 800–1000 °С и дальнейшее повышение температуры может быть достигнуто только при применении новых жаропрочных материалов и внедрении конструкций турбин с охлаждаемыми лопатками.

#### 1.4.2. Цикл с подводом теплоты при $v = const$

В газотурбинной установке, работающей с подводом теплоты при  $v = const$  (рис. 1.18), процесс сгорания идет в замкнутом объеме камеры. Компрессор К, приводимой во вращение газовой турбиной ГТ, подает сжатый воздух в камеру сгорания КС через управляемый кла-

пан Кл1. Второй клапан Кл2 находится в конце камеры сгорания и предназначен для выхода продуктов сгорания на турбину. Подача топлива осуществляется периодически через топливный клапан Кл3.

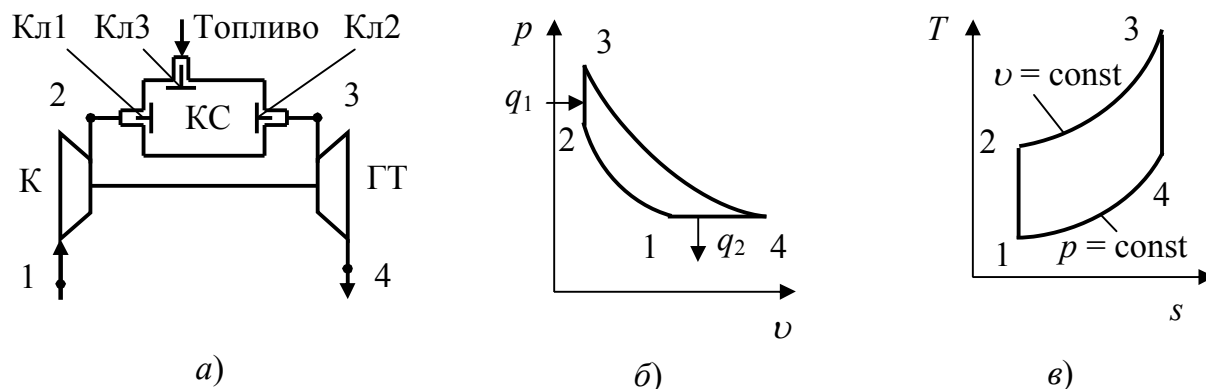


Рис. 1.18. Схема ГТУ с подводом теплоты при  $v = \text{const}$  (а) и цикл в диаграммах  $p-v$  (б) и  $T-s$  (в): К – компрессор; КС – камера сгорания; Кл1-Кл3 – клапаны; ГТ – газовая турбина

В камере сгорания при закрытых клапанах Кл1 и Кл2 происходит процесс горения топлива в постоянном объеме. При увеличении давления клапан Кл2 открывается и продукты сгорания поступают в сопловой аппарат и на лопатки турбины. Далее газ выбрасывается в окружающую среду.

На  $p-v$  и  $T-s$ -диаграммах процессы 1-2 – адиабатное сжатие в компрессоре; 2-3 – подвод теплоты при  $v = \text{const}$ ; 3-4 – адиабатное расширение газа в турбине; 4-1 – изобарная отдача газом теплоты окружающему воздуху.

Основными параметрами цикла являются: степень повышения давления воздуха  $\pi$  и степень изохорного повышения давления  $\lambda$ :

$$\pi = p_2/p_1, \quad \lambda = p_3/p_2.$$

Термический КПД цикла определяется по формуле

$$\eta_t = 1 - \frac{q_2}{q_1} = 1 - \frac{c_p(T_4 - T_1)}{c_p(T_3 - T_2)}.$$

Температуры газа в узловых точках цикла находятся по формулам:

$$\text{точка 2} \quad T_2 = T_1 \pi^{\frac{k-1}{k}}; \quad \text{точка 3} \quad T_3 = T_1 \pi^{\frac{k-1}{k}} \lambda; \quad \text{точка 4} \quad T_4 = T_1 \lambda^{1/k}.$$

## Термический КПД цикла

$$\eta_t = 1 - \frac{k(\lambda^{1/k} - 1)}{\pi^{\frac{k-1}{k}} (\lambda - 1)}. \quad (1.4)$$

## Работа цикла

$$l_{ц} = q_1 \eta_t = c_v T_1 \pi^{\frac{k-1}{k}} (\lambda - 1) \left[ 1 - \frac{k(\lambda^{1/k} - 1)}{\pi^{\frac{k-1}{k}} (\lambda - 1)} \right].$$

Анализ формулы (1.4) показывает, что термический КПД цикла зависит от степени повышения давления и величины  $\lambda$ , характеризующей количество подведенной теплоты.

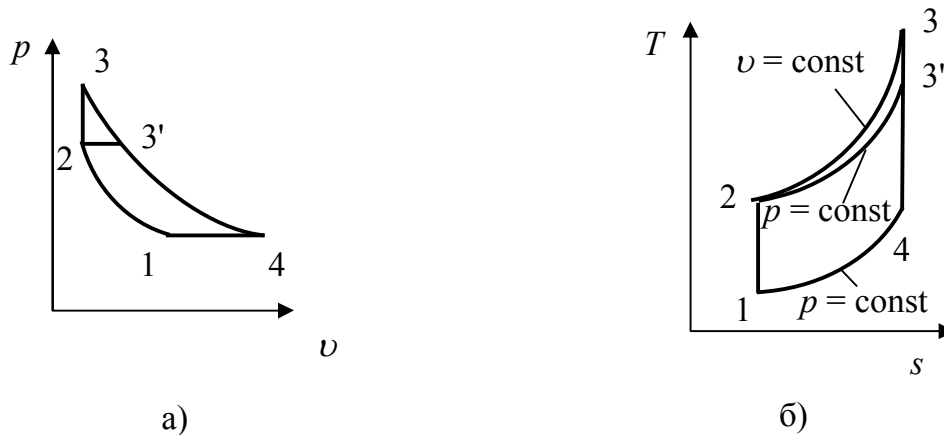


Рис. 1.19. Сравнение между собой циклов с подводом теплоты при  $p = \text{const}$  и  $v = \text{const}$  на  $p-v$  (а) и  $T-s$  (б) диаграммах

Из сравнения между собой циклов с подводом теплоты при  $p = \text{const}$  и  $v = \text{const}$  на  $p-v$ - и  $T-s$ -диаграммах (рис. 1.19) видно, что при одной и той же величине степени повышения давления и одинаковом количестве отведенной теплоты цикл при  $v = \text{const}$  выгоднее цикла при  $p = \text{const}$ .

Это объясняется большей степенью расширения, которая будет в цикле  $v = \text{const}$ , а следовательно, и большими значениями термического КПД. Несмотря на это преимущество, цикл с подводом теплоты при  $v = \text{const}$  широкого применения в практике не нашел в связи с усложнением конструкции камеры сгорания и ухудшением работы турбины в пульсирующем потоке газа.

### 1.4.3. Цикл с регенерацией теплоты

Одной из мер повышения совершенства перехода теплоты в работу в газотурбинной установке является применение регенерации теплоты. Регенерация теплоты заключается в использовании теплоты отработавших газов для подогрева воздуха, поступающего в камеру сгорания (рис. 1.20). Экономичность ГТУ при применении регенерации повышается.

Воздух из компрессора К направляется в регенеративный теплообменник Р, где он получает теплоту от газов, вышедших из турбины. После подогрева воздух направляется в камеру сгорания КС, в которую подается топливо. Воздух, получивший теплоту от отработавших газов, должен получить в камере сгорания меньше теплоты для достижения определенной температуры газа перед турбиной.

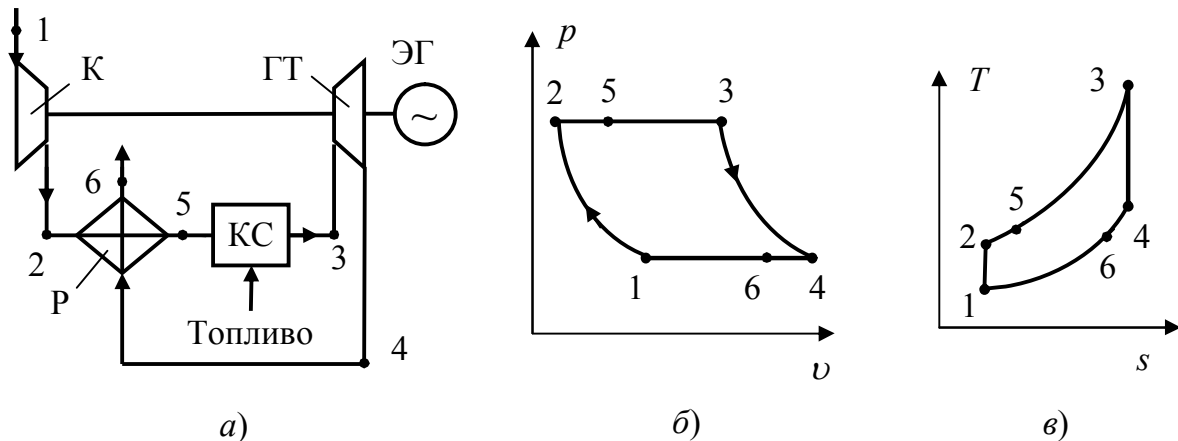


Рис. 1.20. Схема ГТУ с регенерацией (а) и цикл в диаграммах  $p-v$  (б) и  $T-s$  (в): К – компрессор; Р – регенератор; КС – камера сгорания; ГТ – газовая турбина; ЭГ – электрогенератор

Цикл ГТУ с регенерацией теплоты показан на рис. 1.20. На диаграммах: 1-2 – адиабатное сжатие воздуха в компрессоре; 2-5 – изобарный подогрев воздуха в регенераторе; 5-3 – подвод теплоты при  $p = \text{const}$  в камере сгорания; 3-4 – адиабатное расширение газа в турбине; 4-6 – отдача теплоты при  $p = \text{const}$  в регенераторе; 6-1 – отдача теплоты при  $p = \text{const}$  в окружающую среду.

Если предположить, что охлаждение газов в регенераторе происходит до температуры воздуха, поступающего в него,  $T_6 = T_2$ , то регенерация будет полной.

Термический КПД цикла при полной регенерации, когда  $T_4 - T_6 = T_5 - T_2$ , рассчитывается по формуле

$$\eta_t = 1 - q_2 / q_1,$$

где

$$q_1 = c_p(T_3 - T_5) = c_p(T_3 - T_4);$$

$$q_2 = c_p(T_6 - T_1) = c_p(T_2 - T_1).$$

Тогда

$$\eta_t = 1 - \frac{T_2 - T_1}{T_3 - T_4}.$$

При принятых параметрах цикла ГТУ с подводом теплоты при  $p = \text{const}$  температуры в точках 2, 3 и 4 соответственно равны:

$$T_2 = T_1 \pi^{\frac{k-1}{k}}; \quad T_3 = T_1 \pi^{\frac{k-1}{k}} \rho; \quad T_4 = T_1 \rho.$$

Термический КПД цикла

$$\eta_t = 1 - \frac{T_1}{T_4} = 1 - \frac{1}{\rho}.$$

Анализ последней формулы показывает, что термический КПД цикла при полной регенерации зависит от начальной температуры и от температуры в конце адиабатного расширения. Обычно двигатели работают не при полной регенерации, поэтому  $T_6 > T_2$ . При этом термический КПД цикла должен учитывать *степень регенерации*, определяемую как отношение количества теплоты, переданной воздуху, к тому количеству теплоты, которое могло бы быть передано при охлаждении газов до температуры воздуха.

Степень регенерации

$$\sigma = \frac{T_5 - T_2}{T_4 - T_6}.$$

Величина степени регенерации определяется качеством и величиной рабочих поверхностей теплообменника (регенератора).

В настоящее время регенерация теплоты находит практическое применение в основном в стационарных установках и реже в транспортных установках из-за большой массы и габаритов регенератора.

## 1.5. Комбинированные силовые установки

### 1.5.1. Парогазовая установка

На рис. 1.21 представлена принципиальная схема (а) и теоретический цикл (б) комбинированной энергоустановки, созданной на базе газотурбинного (ГТД) и паротурбинного двигателей (ПТД), применяемых на электростанциях.

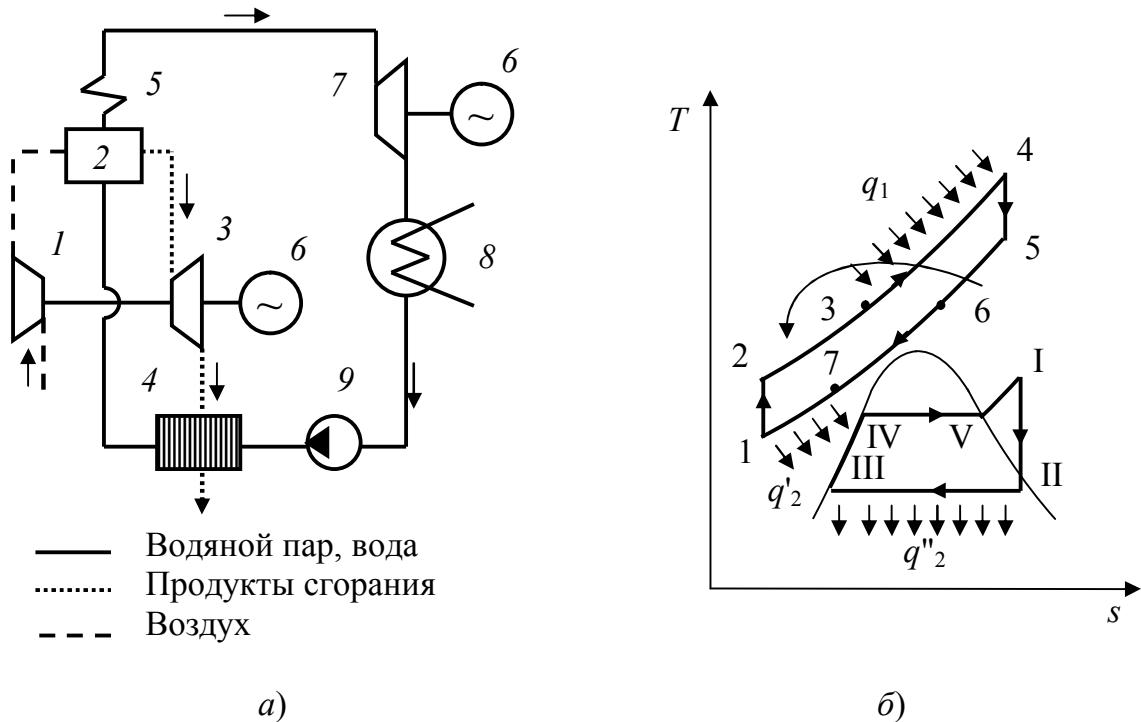


Рис. 1.21. Принципиальная схема (а) и цикл (б) комбинированной установки: 1 – воздушный компрессор; 2 – парогазогенератор; 3 – газовая турбина; 4 – регенератор; 5 – пароперегреватель; 6 – электрогенератор; 7 – паровая турбина; 8 – конденсатор; 9 – насос конденсатный

Принцип работы установки следующий. Атмосферный воздух сжимается адиабатически в компрессоре 1 (процесс 1-2) и подается в парогенератор 2, где осуществляется подвод теплоты (процесс 2-3-4). Продукты сгорания высокой температуры и давления адиабатически расширяются в газовой турбине 3 (процесс 4-5), совершая работу. Часть работы расходуется на привод компрессора 1, а другая часть на привод электрогенератора 6. Продукты сгорания относительно высокой температуры направляются в регенеративный воздухоподогреватель (на схеме он отсутствует) и далее в регенератор 4 котла-парогенератора 2. Процессы 5-6 – отдача теплоты воздуху в регенеративном воздухоподогревателе; 6-7 – отдача теплоты воде в регенера-

торе котла-парогенератора; 7-1 – отвод теплоты к холодному источнику (с продуктами сгорания, выбрасываемыми в атмосферу). Процессы цикла паросиловой установки известны.

Использование комбинированной установки, созданной на базе ГТД и ПТД, позволяет увеличить интервал между экстремальными температурами цикла (для ГТД  $t_{MAX} = 800-1000$  °С, для ПТД  $t_{MIN} = 20-30$  °С), а также получить ряд других выгод от соединения достоинств и исключения недостатков этих двигателей (уменьшить расход воды, обеспечить прочность турбин и т.д.).

Увеличение термического КПД такой комбинированной установки по сравнению с отдельными ГТД и ПТД происходит за счет уменьшения количества теплоты, затрачиваемой на образование пара в котле. Полезная же работа остается неизменной, т.е. равной сумме работ, совершаемых в обоих циклах в отдельности. Тогда КПД комбинированного цикла выразится отношением

$$\eta_t^{ПТ} = \frac{w^Г + w^П}{q_{Г1}^Г + q_{П1}^П},$$

где  $w^Г$  и  $w^П$  – работа соответственно в ГТД и ПТД;  $q_{Г1}^Г$  и  $q_{П1}^П$  – теплота, подводимая в циклах от постороннего источника.

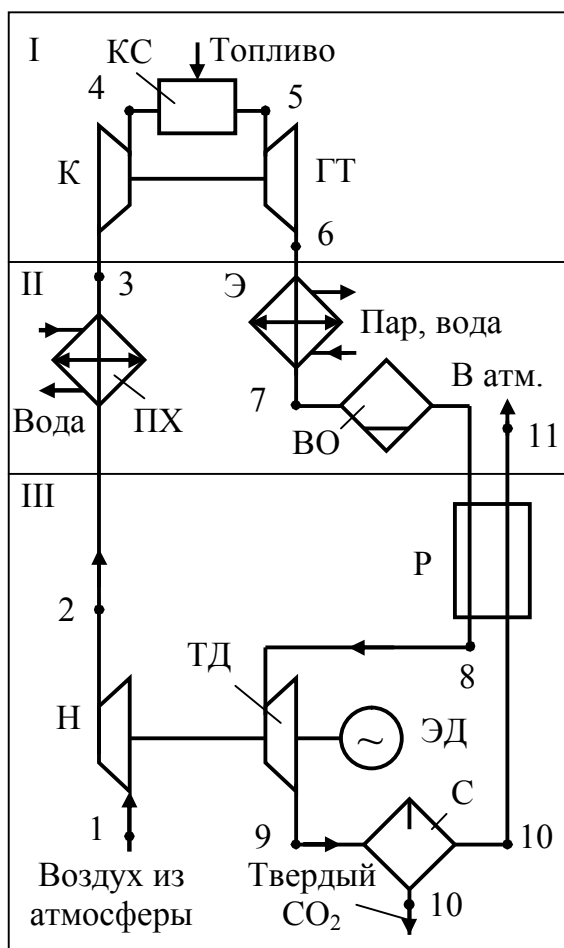
КПД комбинированных циклов ГТД–ПТД достигает 50–55 %.

### ***1.5.2. Установка для комплексного производства теплоты и твердого диоксида углерода***

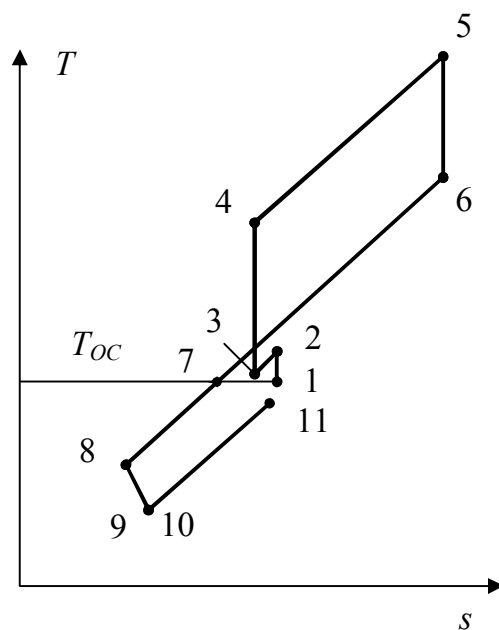
Установка состоит (рис. 1.22) из газотурбогенератора I, теплоутилизационной части II и холодильной части III [2]. Газотурбогенератор предназначен для получения газозвушной смеси с высокой температурой и избыточным давлением, теплоутилизационная часть – для получения пара и горячей воды за счет тепловой энергии газозвушной смеси, холодильная часть – для получения твердого диоксида углерода при расширении продуктов сгорания топлива, имеющих избыточное давление.

Засасываемый из атмосферы воздух сжимается турбоагнетателем Н и через водяной промежуточный холодильник ПХ (процесс 1-2-3) подается в компрессор К, где сжимается (процесс 3-4). Сжатый воздух нагнетается в камеру сгорания КС и подогревается (процесс 4-5) до температуры 1000 – 1200 К при сжигании жидкого или газообразного топлива. Высокотемпературная газозвушная смесь поступает

на частичное расширение в газовую турбину ГТ (процесс 5-6), мощность которой используется для привода компрессора, и затем в экономайзер Э, где благодаря теплообмену с питательной водой (процесс 6-7) вырабатывается пар или горячая вода. Далее газовый поток, пройдя влагоотделитель ВО, направляется в холодильную часть, где охлаждается (процесс 7-8) обратным потоком в регенераторе Р.



а)



б)

Рис. 1.22. Принципиальная схема (а) и цикл (б) теплохладоэнергетического агрегата: Н – нагнетатель; ПХ – промежуточный холодильник; К – компрессор; КС – камера сгорания; ГТ – газовая турбина; Э – экономайзер; ВО – влагоотделитель; Р – регенеративный теплообменник; ТД – турбодетандер; С – сепаратор  $\text{CO}_2$ ; ЭД – электродвигатель

При расширении продуктов сгорания топлива (ПСТ) в турбодетандере (процесс 8-9) температура потока снижается ниже температуры насыщения твердого диоксида углерода ( $\text{CO}_2$ ) и происходит выпадение твердой фазы  $\text{CO}_2$ , которая затем отделяется в сепараторе С. Обратный поток газов направляется в блок регенераторов, охлаждает

прямой поток (процесс 10-11) и затем выбрасывается в атмосферу. Работа расширения парогазовой смеси в турбодетандере используется для частичной компенсации энергии, потребляемой нагнетателем от асинхронного электродвигателя ЭД.

Таким образом, сущность работы установки заключается в поэтапном охлаждении ПСТ, вырабатываемых газотурбогенератором при повышенном давлении и температуре в экономайзере, для получения пара или горячей воды, и дальнейшем охлаждении в регенеративном теплообменнике и турбодетандере.

В рассматриваемой схеме ПСТ не только совершают работу в газовой турбине и турбодетандере, но и являются холодильным агентом. Это приводит к снижению энергетических потерь, связанных с преобразованием энергии, имеющих место в обычных теплосиловых и холодильных установках. Повышение давления газа в теплоутилизационной части и конденсация водяных паров, присутствующих в ПСТ, увеличивает коэффициент теплопередачи и позволяет уменьшить поверхность теплообменных аппаратов и их металлоемкость.

Важной особенностью процесса охлаждения в экономайзере является использование теплоты конденсации водяных паров продуктов горения. В рабочем процессе цикла используется высшая теплотворная способность топлива. Известно, что разность между высшей и низшей теплотворной способностью, например, для природного газа, составляет 12 %, вследствие чего утилизация этой низкопотенциальной теплоты в цикле обеспечивает значительное повышение теплового эффекта.

Следует отметить, что высокий экологический эффект установки связан с уменьшением загрязнений окружающей среды вследствие снижения теплотерь и выбросов  $\text{CO}_2$  и токсичных окислов азота и серы в атмосферу с отработавшими ПСТ. Совместная конденсация окислов азота и серы с водяными парами происходит в теплоутилизационной части установки.

### ***Контрольные вопросы***

1. Как практически осуществляется регенерация теплоты в паросиловых установках? Изобразите для примера принципиальную схему такой установки с одним регенеративным отбором и объясните, почему термический КПД цикла в этом случае выше, чем у цикла Ренкина при тех же параметрах пара?

2. Почему применение цикла Карно в паросиловых установках технически неосуществимо? Какие преимущества по сравнению с ним имеет цикл Ренкина?

3. Изобразите в  $p-v$ - и  $T-s$ -диаграммах цикл Ренкина и поясните, что представляет собой отдельные процессы, из которых он состоит. В каких элементах паросиловой установки протекают эти процессы?

4. Что такое коэффициент использования теплоты теплофикационной установки? Чему равно предельно высокое значение этого коэффициента для идеальной паросиловой установки, и каких значений он может достичь в действительности?

5. Покажите в  $p-v$ -диаграмме цикла Ренкина работу, затрачиваемую на привод насоса. Почему при низких и средних давления пара этой работой можно пренебречь? Как отражается это упрощение на формуле для определения термического КПД цикла Ренкина?

6. Изобразите в  $T-s$ -диаграмме цикл Ренкина с учетом работы насоса. Как изменится температура воды при адиабатном повышении ее давления в насосе?

17. Изобразите в  $T-s$ -диаграмме цикл паросиловой установки с промежуточным перегревом пара. Покажите на графике дополнительную по сравнению с циклом Ренкина затрату теплоты и добавочную полезную работу цикла. Составьте выражение для определения термического КПД цикла.

8. Приведите принципиальную схему паросиловой установки, работающей по циклу Ренкина, и изобразите этот цикл в  $p-v$ - и  $T-s$ -диаграммах.

9. Как влияют начальные параметры пара на термический КПД цикла Ренкина?

10. Составьте уравнение теплового баланса смешивающего регенеративного подогревателя паросиловой установки с одним регенеративным отбором и напишите выражение для определения ее термического КПД.

## 2. РАСЧЕТ ТЕПЛОВЫХ СХЕМ И ЭЛЕМЕНТОВ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

### 2.1. Расчет паросиловых установок

**Задача 1.** Для паросиловой установки (см. рис. 1.11, а) установить влияние начальных давлений (см. рис. 1.12, а) и температур (см. рис. 1.12, б) на термический КПД цикла.

**Решение.** Термический КПД цикла определяется по формуле

$$\eta_t = \frac{l}{q_1} = \frac{q_1 - q_2}{q_1} = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_3}.$$

#### Контрольная задача для самостоятельного решения.

Для паросиловой установки (см. рис. 1.11, а) установить влияние начальных давлений и температур на термический КПД цикла. Варианты контрольных задач приведены в табл. 2.1 и 2.2.

Таблица 2.1

#### Влияние начальных давлений на экономичность цикла Ренкина

Параметры	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$p_1$ , МПа	5 – 25									
$t_1$ , °С	400	420	450	470	500	520	400	430	400	450
$p_2$ , кПа	3,5	4,0	4,5	5,0	4,0	4,5	5,0	5,5	4,5	5,0

Таблица 2.2

#### Влияние начальных температур на экономичность цикла Ренкина

Параметры	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$t_1$ , °С	300 – 600									
$p_1$ , МПа	5	10	15	20	25	10	15	20	25	15
$p_2$ , кПа	3,5	4,0	4,5	5,0	4,0	4,5	5,0	5,5	4,5	5,0

**Задача 2.** Определить расход пара и термический КПД паротурбинной электростанции мощностью 12 МВт с начальными параметрами пара  $p_0 = 3,5$  МПа;  $t_0 = 435$  °С; давление в конденсаторе  $p_K = 5$  кПа; внутренний относительный КПД турбины  $\eta_{oi} = 0,82$ ; электромеханический КПД  $\eta_{эм} = 0,92$ .

**Решение.** Расход пара в паровой турбине связан с мощностью

$$N_{э} = D(h_0 - h_{KS})\eta_{oi}\eta_{эм}, \quad (2.1)$$

где  $N_{э}$  – электрическая мощность турбогенератора, кВт;  $D$  – расход пара на турбину при работе без отборов, кг/с;  $h_0, h_{KS}$  – энтальпия пара

в начальной точке (перед турбиной) и в конце изоэнтропного расширения (в конденсаторе), кДж/кг.

По заданным начальным и конечным параметрам  $p_0$ ,  $t_0$ ,  $p_K$  можно определить значения  $h_0$  и  $h_{KS}$  по таблицам и диаграммам водяного пара. На рис. 2.1 показан процесс расширения пара в  $h$ - $s$ -диаграмме водяного пара.

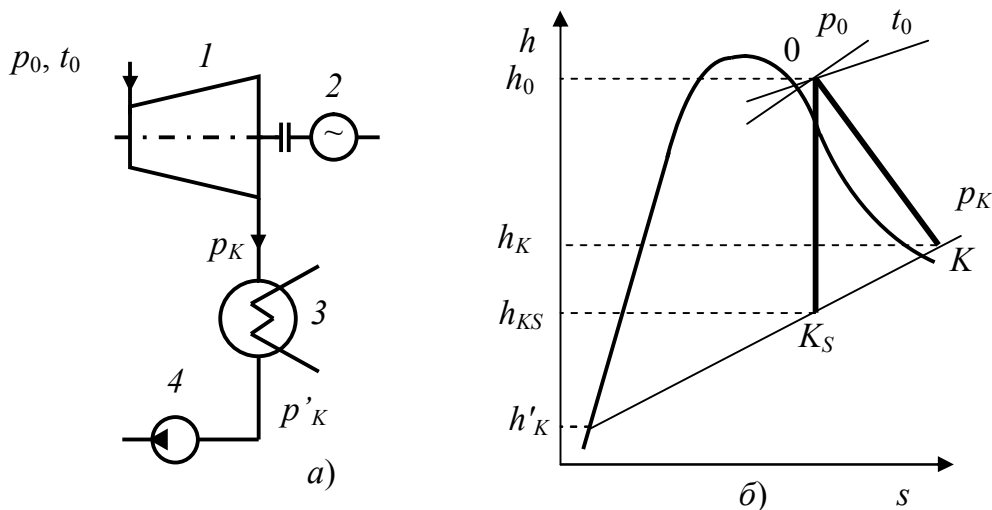


Рис. 2.1. Паротурбинная установка: а – схема; б – процесс расширения в диаграмме; 1 – турбина; 2 – электрогенератор; 3 – конденсатор; 4 – конденсатный насос

Точку 0 находят в поле диаграммы на пересечении начальной изобары  $p_0$  и начальной изотермы  $t_0$ . В точке 0 определяют начальную энтальпию  $h_0 = 3303$  кДж/кг и энтропию  $s_0 = 6,9589$  кДж/кг. От точки 0 строят изоэнтропный процесс расширения пара в проточной части турбины ( $s_0 = \text{const}$ ) до пересечения с конечной изобарой  $p_K$ . В точке пересечения определяют  $h_{KS} = 2124$  кДж/кг – энтальпию пара в конце расширения.

На рис. 2.1 также показан действительный процесс расширения пара с учетом потерь, характеризуемых  $\eta_{oi}$ . Для построения действительного процесса находят конечную энтальпию:

$$h_K = h_0 - (h_0 - h_{KS}) \eta_{oi} = 3303 - (3303 - 2124) \cdot 0,82 = 2336 \text{ кДж/кг.}$$

На пересечении изобары  $p_K$  и энтальпии  $h_K$  находят конечную точку процесса  $K$  и соединяют ее с начальной точкой 0. Зная энтальпию  $h_0$ ,  $h_{KS}$ , по заданной мощности  $N_{\text{Э}}$  находят расход пара на турбогенератор, используя формулу (2.1):

$$D = \frac{N_{\text{э}}}{(h_0 - h_{\text{КС}}) \eta_{\text{Ои}} \eta_{\text{ЭМ}}} = \frac{12 \cdot 10^3}{(3303 - 2124) \cdot 0,82 \cdot 0,92} = 13,49 \text{ кг/с.}$$

Для определения термического КПД цикла без учета работы питательного насоса необходимо определить энтальпию конденсата на выходе из конденсатора паровой турбины  $h'_K$ . Если считать, что конденсат в конденсаторе не переохлаждается, то значение энтальпии жидкости  $h'_K = h_{\text{Ж}}$  находят по давлению в конденсаторе  $p_K$ , пользуясь таблицами свойств водяного пара: при 5 кПа  $h'_K = 137,8$  кДж/кг.

Термический КПД цикла Ренкина

$$\eta_t = \frac{h_0 - h_{\text{КС}}}{h_0 - h'_K} = \frac{3303 - 2124}{3303 - 137,8} = 0,372.$$

### Контрольная задача для самостоятельного решения.

Определить расход пара и термический КПД паротурбинной электростанции с начальными параметрами пара перед турбиной:  $p_0, t_0$ ; давление пара за турбиной  $p_K$ ; внутренний относительный КПД турбины  $\eta_{\text{Ои}} = 0,82$ ; электромеханический КПД  $\eta_{\text{ЭМ}} = 0,92$ ; мощность турбины  $N$ . Турбина работает с выключенной регенерацией.

Таблица 2.2

### Варианты контрольных заданий

Параметры	Варианты заданий									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$p_0$ , МПа	12	13	14	15	16	17	18	19	20	15
$t_0$ , °С	400	450	500	550	400	450	500	550	400	450
$p_K$ , кПа	6,0	7,0	8,0	5,0	6,0	7,0	8,0	5,0	6,0	7,0
$N_{\text{э}}$ , МВт	8	10	12	15	20	25	30	35	40	45

**Задача 3.** Как изменится расход пара на турбину (см. задачу 2), если будет применен регенеративный подогрев питательной воды паром из отбора турбины  $p_{\text{ОТБ}} = 0,1$  МПа в смешивающем подогревателе до температуры  $t_{\text{ПВ}} = 100$  °С (рис. 5.4)? Определить, как изменится термический КПД цикла с введением регенеративного подогрева.

**Решение.** Расход пара на турбину с отбором при той же электрической мощности  $N_{\text{э}} = 12$  МВт = idem находится по формуле В.И. Гриневецкого:

$$D_T = D + yD_{\text{ОТБ}} = \frac{N_{\text{э}}}{(h_0 - h_{\text{КС}}) \eta_{\text{Ои}} \eta_{\text{ЭМ}}} + \frac{h_{\text{ОТБ}} - h_K}{h_0 - h_K} D_{\text{ОТБ}}, \quad (2.2)$$

где  $y = (h_{OTB} - h_K)/(h_0 - h_K)$  – коэффициент недовыработки мощности паром турбины;  $D_{OTP}$  – расход пара из отбора турбины на регенеративный подогрев конденсата.

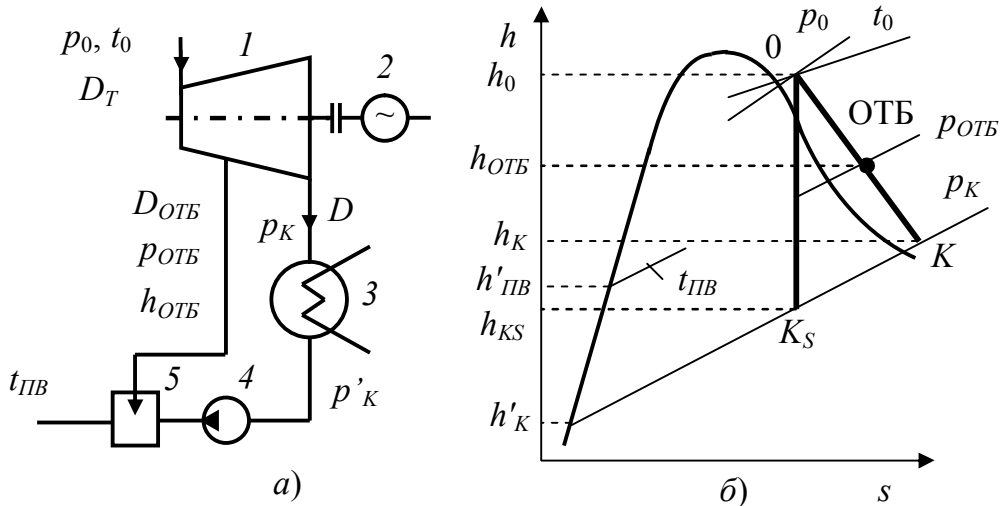


Рис. 2.2. Паротурбинная установка: а – схема; б – процесс расширения в диаграмме; 1 – турбина; 2 – электрогенератор; 3 – конденсатор; 4 – конденсатный насос; 5 – регенеративный смешивающий подогреватель

Отбор  $D_{OTB}$  обычно выражают в долях расхода пара на турбину:  $D_{OTB} = aD_T$ , где  $a$  – доля отбора для смешивающего подогревателя. Эта доля определяется по тепловому балансу подогревателя и составляет

$$a = (h'_{ПВ} - h'_K)/(h_{OTB} - h'_K)$$

Подставляя в (2.2) выражение для  $D_{OTB}$ , находим

$$D_T = D + yD_{OTB} = D + yaD_T;$$

$$D_T = D/(1 - ya).$$

Таким образом, расход пара на турбину с отбором находят через ранее известное значение расхода пара на турбину  $D$  и значения  $a$  и  $y$ .

Для определения  $y$  находят энтальпию пара в отборе  $h_{OTB}$  и конечную энтальпию пара  $h_K$ , пользуясь таким же методом построения процесса расширения пара, как и в задаче 2:  $h_{OTB} = 2653$  кДж/кг;  $h_K = 2336$  кДж/кг.

Определяют значения  $a$  и  $y$  по приведенным выше формулам, предварительно находя по таблицам воды и водяного пара  $h'_{ПВ} = 413$  кДж/кг при  $t_{ПВ} = 100$  °С,  $h'_K = 137,7$  кДж/кг,  $t_K = 32,9$  °С:

$$a = \frac{h'_{ПВ} - h'_K}{h_{ОТБ} - h'_K} = \frac{413 - 137,7}{2653 - 137,7} = 0,109;$$

$$y = \frac{h_{ОТБ} - h_K}{h_0 - h_K} = \frac{2653 - 2336}{3303 - 2336} = 0,328.$$

По известным значениям  $a$ ,  $y$ ,  $D$  далее находят

$$D_T = \frac{D}{1 - ay} = \frac{13,49}{1 - 0,109 \cdot 0,328} = 13,99 \text{ кг/с};$$

$$D_{ОТБ} = aD_T = 0,109 \cdot 13,99 = 1,53 \text{ кг/с}.$$

Проверка правильности решения:

$$D_T = D + yD_{ОТБ} = 13,49 + 0,328 \cdot 1,53 = 13,99 \text{ кг/с}.$$

Термический КПД цикла с регенерацией

$$\eta_t^P = \frac{(h_0 - h_{KS})(1 - ay)}{h_0 - h'_{ПВ}} = \frac{(3303 - 2124)(1 - 0,109 \cdot 0,328)}{3303 - 413} = 0,393.$$

Относительный прирост КПД

$$\Delta\eta_t = \frac{\eta_t^P - \eta_t}{\eta_t} \cdot 100 = \frac{0,393 - 0,372}{0,372} \cdot 100 = 5,6 \text{ \%}.$$

### **Контрольная задача для самостоятельного решения.**

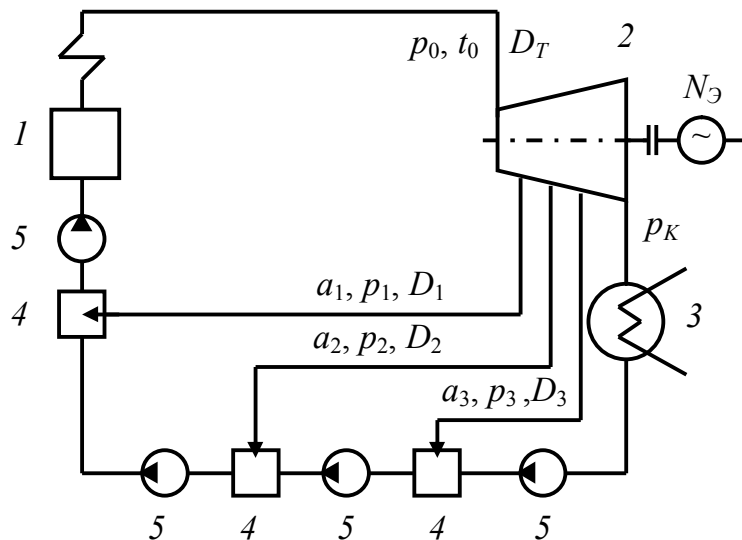
Как изменится расход пара на турбину (см. задачу 2), если будет применен регенеративный подогрев питательной воды паром из отбора турбины  $p_{ОТБ}$  в смешивающем подогревателе до температуры  $t_{ПВ}$ ? Определить также, как изменится термический КПД цикла с введением регенеративного подогрева.

## Варианты контрольных заданий

Параметры	Варианты заданий									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$p_0$ , МПа	12	13	14	15	16	17	18	19	20	15
$t_0$ , °С	400	450	500	550	400	450	500	550	400	450
$p_K$ , кПа	6,0	7,0	8,0	5,0	6,0	7,0	8,0	5,0	6,0	7,0
$N_{Э}$ , МВт	8	10	12	15	20	25	30	35	40	45
$p_{ОТБ}$ , МПа	0,11	0,12	0,13	0,11	0,12	0,13	0,11	0,12	0,13	0,12
$t_{ПВ}$ , °С	102	105	107	102	105	107	102	105	107	105

**Задача 4.** Определить расход пара и термический КПД паротурбинной установки с параметрами  $p_0 = 4$  МПа;  $t_0 = 450$  °С;  $p_K = 4$  кПа с регенеративным подогревом конденсата в трех смешивающих подогревателях (рис. 2.3) до температуры питательной воды  $t_{ПВ} = 150$  °С;  $\eta_{0i} = 0,85$ ;  $\eta_{ЭМ} = 0,93$ ;  $N_{Э} = 25$  МВт.

Рис. 2.3. Принципиальная схема паротурбинной установки с тремя регенеративными смешивающими подогревателями: 1 – паровой котел; 2 – турбогенератор; 3 – конденсатор; 4 – регенеративный смешивающий подогреватель; 5 – насосы



**Решение.** Задача решается таким же методом, что и задача 3. Предварительно определяют параметры и расход отборов пара на регенерацию  $D_1$ ,  $D_2$ ,  $D_3$  в долях общего расхода пара на турбину  $D_T$ :

$$D_1 = a_1 D_T; \quad D_2 = a_2 D_T;$$

$$D_3 = a_3 D_T.$$

Параметры отборов  $p_1, p_2, p_3$  и  $h_1, h_2$  и  $h_3$  определяют построением процесса расширения пара в  $h-s$ -диаграмме (рис. 2.4). Давления в отборах определяют по температурам насыщения в смешивающих подогревателях при заданном равномерном распределении подогрева по ступеням. Интервал регенеративного подогрева определяют заданной  $t_{ПВ} = 150 \text{ }^\circ\text{C}$  и  $t_K = 28,6 \text{ }^\circ\text{C}$  при  $p_K = 4 \text{ кПа}$ . Интервал подогрева

$$\Delta t = t_{ПВ} - t_K = 150 - 28,6 = 121,4 \text{ }^\circ\text{C}.$$

На ступень подогрева будет приходится

$$\Delta t_{CT} = \frac{\Delta t}{3} = \frac{121,4}{3} = 40,5 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Температура насыщения третьего регенеративного отбора

$$t_{3H} = t_K + t_{CT} = 28,6 + 40,5 = 69,1 \text{ }^\circ\text{C}.$$

По таблицам при найденной температуре  $t_{3H} = 69,1 \text{ }^\circ\text{C}$  давление в третьем отборе составит  $p_3 = 30 \text{ кПа}$ .

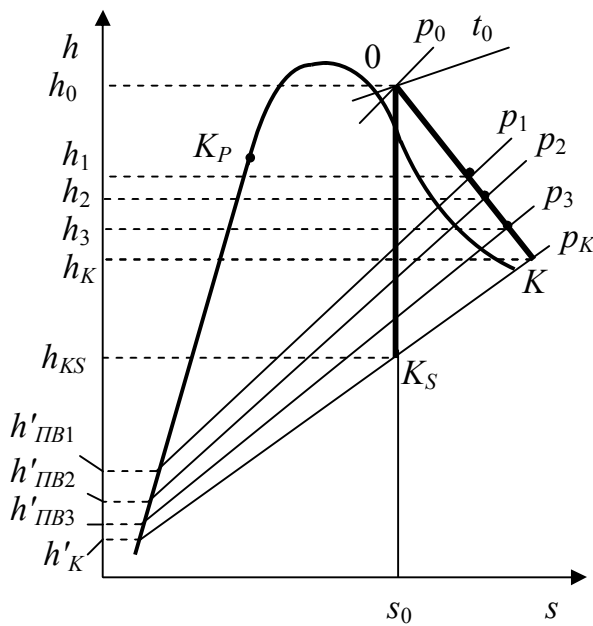


Рис. 2.4. Процесс расширения в диаграмме

Аналогично находят  $t_{2H}$  и  $p_2$ ;  $t_{1H}$  и  $p_1$ :

$$t_{2H} = t_K + \Delta t_{CT} + \Delta t_{CT} = 28,6 + 40,5 + 40,5 = 109,6 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$p_2 = 0,142 \text{ МПа};$$

$$t_{1H} = t_K + 3\Delta t_{CT} = t_{2H} + t_{CT} = 109,6 + 40,5 = 150,1 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Так как  $t_{ПВ} = 150 \text{ }^\circ\text{C}$ , подогрев в последней ступени следует принять равным  $40,4 \text{ }^\circ\text{C}$ . Тогда

$$t_{1H} = t_{ПВ} = 109,6 + 40,4 = 150 \text{ }^\circ\text{C}$$

и  $p_1 = 0,475 \text{ МПа}$ .

По процессу расширения пара в  $h$ - $s$ -диаграмме с учетом  $\eta_{oi}$  находят  $h_0 = 3332$  кДж/кг;  $h_K = 2281$  кДж/кг;  $h_3 = 2508$  кДж/кг;  $h_2 = 2718$  кДж/кг;  $h_1 = 2908$  кДж/кг. Затем по тем же формулам, что и в решении задачи 3, находят  $a_1, y_1, a_2, y_2, a_3, y_3$ :

$$a_3 = \frac{h'_{1H} - h'_K}{h_1 - h'_{1H}} = \frac{289,3 - 119,6}{2508 - 289,3} = 0,0765,$$

где

$$h'_{1H} = c_p t_{1H} = 4,19 \cdot 69,1 = 289,3 \text{ кДж/кг};$$

$$h'_K = c_p t_K = 4,19 \cdot 28,6 = 119,6 \text{ кДж/кг}.$$

$$y_3 = \frac{h_1 - h_K}{h_0 - h_K} = \frac{2508 - 2281}{3332 - 2281} = 0,216;$$

$$a_2 = \frac{h'_{2H} - h'_{1H}}{h_2 - h'_{2H}} = \frac{458 - 289,3}{2718 - 458} = 0,0747,$$

где

$$h'_{2H} = c_p t_{2H} = 4,19 \cdot 109,6 = 458 \text{ кДж/кг}.$$

$$y_2 = \frac{h_2 - h_K}{h_0 - h_K} = \frac{2718 - 2281}{3332 - 2281} = 0,406;$$

$$a_1 = \frac{h'_{3H} - h'_{2H}}{h_2 - h'_{2H}} = \frac{628 - 458}{2908 - 628} = 0,0746,$$

где

$$y_1 = \frac{h_3 - h_K}{h_0 - h_K} = \frac{2908 - 2281}{3332 - 2281} = 0,597.$$

Определяют расход пара на турбину с учетом регенеративных отборов:

$$D_T = \frac{N_{\text{э}}}{(h_0 - h_K) \eta_{\text{эм}} \left( 1 - \sum_{i=1}^n a_i y_i \right)} = \frac{25000}{(3332 - 2281) \cdot 0,93 \cdot (1 - 0,0765 \times \rightarrow \\ \rightarrow \times 0,216 - 0,0747 \cdot 0,406 - 0,0746 \cdot 0,597)} = 28,4 \text{ кг/с}.$$

Термический КПД цикла с регенерацией

$$\eta_t^P = \frac{(h_0 - h_{KS}) \left( 1 - \sum_{i=1}^n a_i y_i \right)}{h_0 - h_{ПВ}} = \frac{(3332 - 2092) \cdot 0,908}{3332 - 628} = 0,416.$$

Термический КПД цикла без регенерации (для этих же параметров)

$$\eta_t^P = \frac{h_0 - h_{KS}}{h_0 - h'_K} = \frac{3332 - 2092}{3332 - 119,6} = 0,386.$$

Приращение КПД вследствие регенерации составит

$$\varepsilon = \frac{\eta_t^P - \eta_t}{\eta_t} = \frac{0,416 - 0,386}{0,386} = 0,0777 \text{ или } 7,77 \%.$$

### Контрольная задача для самостоятельного решения.

Определить расход пара и термический КПД паротурбинной установки с параметрами  $p_0$ ;  $t_0$ ;  $p_K$  с регенеративным подогревом конденсата в трех смешивающих подогревателях (рис. 2.4) до температуры питательной воды  $t_{ПВ}$ ;  $\eta_{oi} = 0,85$ ;  $\eta_{ЭМ} = 0,93$ ;  $N_{Э}$ .

Таблица 2.4

### Варианты контрольных заданий

Параметры	Варианты заданий									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$p_0$ , МПа	6,0	5,5	5,0	4,5	4,0	6,0	5,5	5,0	4,5	4,0
$t_0$ , °С	460	440	420	400	460	440	420	400	460	420
$p_K$ , кПа	4,0	4,2	4,4	4,6	4,8	5,0	5,2	5,4	5,6	5,8
$t_{ПВ}$ , °С	155	150	145	155	150	145	155	150	145	155
$N_{Э}$ , МВт	20	25	30	35	40	20	25	30	35	40

**Задача 5.** Рассчитать принципиальную схему станции с турбиной Р-100-13/15 (ЛМЗ) при следующих исходных данных [1]:

– начальные параметры пара перед турбиной  $p_0 = 12,74$  МПа,  $t_0 = 560$  °С;

– давление за турбиной  $p_K = 1,0$  МПа;

– отпуск пара внешнему потребителю из противодавления  $D_{ВП} = 540$  т/ч;

– внутренний относительный КПД турбины  $\eta_{oi} = 0,844$ ;



ратурой питательной воды данная задача может быть решена лишь методом предварительной оценки расхода пара на турбину с последующим уточнением (метод последовательных приближений).

Для предварительной оценки расхода пара на турбину расчетную схему представим в ином виде, заменив регенеративную систему из трех поверхностных подогревателей одним условным смешивающим регенеративным подогревателем (рис. 2.6). В этом случае расход пара на турбину

$$D_T = D_{ПД} + D_P,$$

где

$$D_{ПД} = D_{ВП} + D_D.$$

Здесь  $D_{ВП}$  – отпуск пара внешнему потребителю;  $D_{П}$  – расход пара на деаэратор;  $D_P$  – расход пара из отбора в условном смешивающем регенеративном подогревателе.

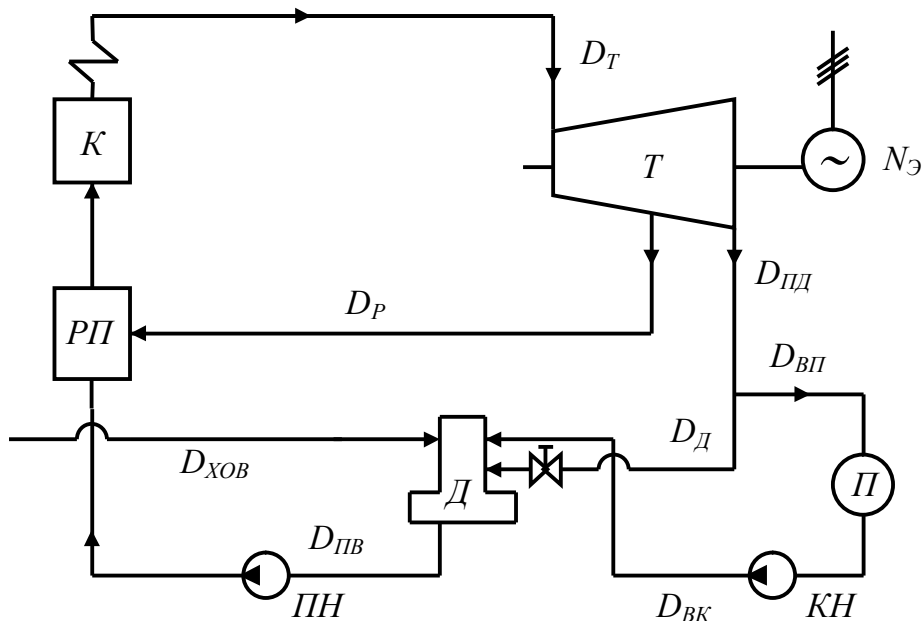


Рис. 2.6. К решению задачи 5: РП – регенеративный подогреватель смешивающего типа

Строим рабочий процесс в турбине в  $h-s$ -диаграмме (рис. 2.7) и находим  $h_K = 2930$  кДж/кг.

На основе материального и теплового балансов оцениваем расход пара на деаэратор:

$$D_{\text{Д}} = \frac{D_{\text{ХОВ}}(h'_{\text{Д}} - h'_{\text{ХОВ}}) + D_{\text{БК}}(h'_{\text{Д}} - h'_{\text{БК}})}{h_{\text{К}} - h'_{\text{Д}}},$$

где  $D_{\text{БК}}$  – расход возвращаемого конденсата, т/ч.

Расход химически очищенной воды

$$D_{\text{ХОВ}} = (1 - \varphi_{\text{БК}})D_{\text{ВП}} + D_{\text{УТ}} + D'_{\text{ПРОД}}.$$

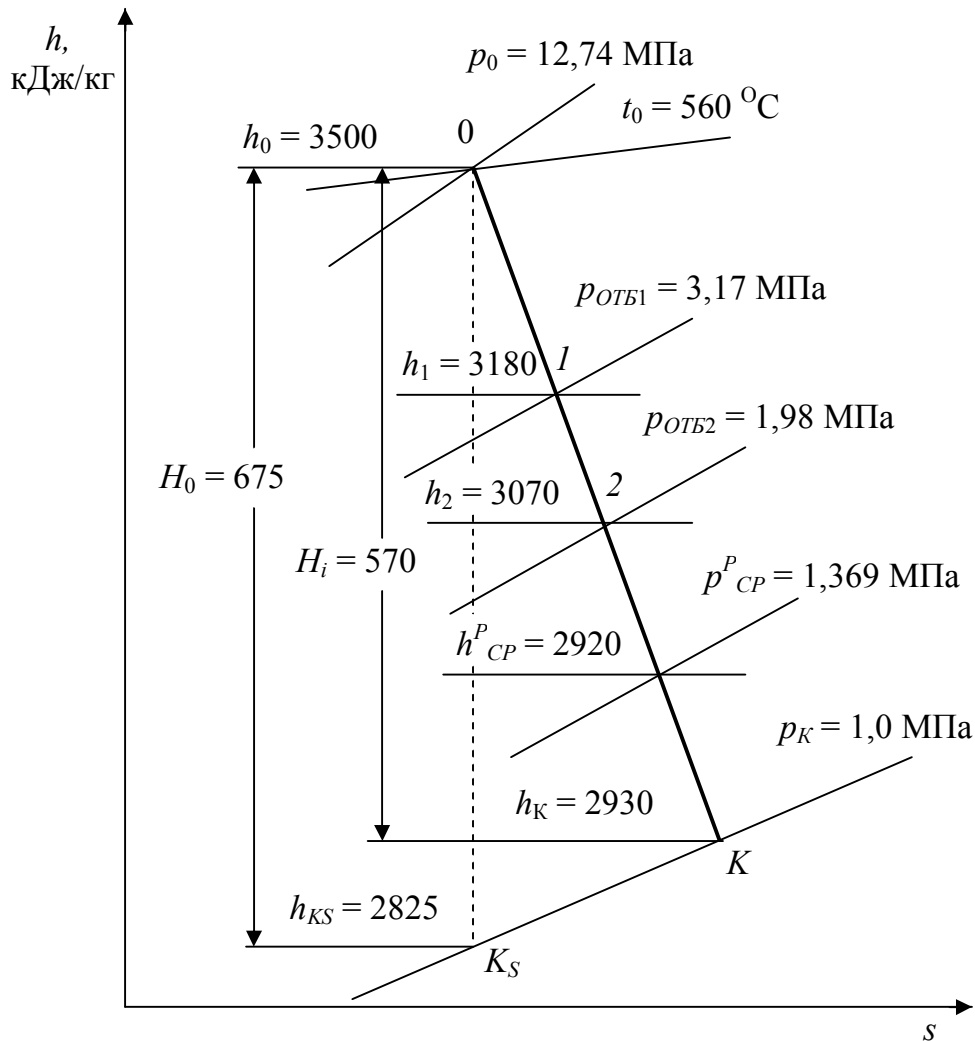


Рис. 2.7. Процесс расширения пара в турбине Р-100-130/15 ЛМЗ в  $h$ - $s$ -диаграмме

Оцениваем  $D_{\text{УТ}} + D'_{\text{ПРОД}} \sim 15$  т/ч. Тогда

$$D_{\text{ХОВ}} = (1 - 0,85) \cdot 540 + 15 = 96 \text{ т/ч};$$

$$D_{\text{д}} = \frac{96 \cdot (666,8 - 125,6) + 459 \cdot (666,8 - 293)}{2930 - 666,8} = 98,77 \text{ т/ч.}$$

Предварительный расход пара из противодавления

$$D_{\text{пцд}} = D_{\text{вп}} + D_{\text{д}} = 540 + 98,77 = 638,77 \text{ т/ч.}$$

Задаемся температурой питательной воды  $t_{\text{пв}} = 230 \text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Определяем параметры среднего условного регенеративного отбора пара. Температура питательной воды в смешивающем регенеративном подогревателе

$$t_{\text{р}}^{\text{ср}} = \frac{t_{\text{пв}} + t_{\text{д}}}{2} = \frac{230 + 158}{2} = 194 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Давление в среднем регенеративном отборе

$$p_{\text{р}}^{\text{ср}} = f(t_{\text{р}}^{\text{ср}}) = 1,369 \text{ МПа.}$$

По  $h$ - $s$ -диаграмме находим  $h_{\text{р}}^{\text{ср}} = 2990 \text{ кДж/кг}$ .

Определяем расход пара в условном регенеративном подогревателе. Уравнение теплового баланса

$$D_{\text{р}}^{\text{ср}} (h_{\text{р}}^{\text{ср}} - h'_{\text{пв}}) \eta_{\text{ТА}} = [D_{\text{пцд}} + D_{\text{ут}} + D_{\text{прод}}] (h'_{\text{пв}} - h'_{\text{д}}),$$

где  $\eta_{\text{ТА}} = 0,98$  – КПД теплообменного аппарата; отсюда

$$\begin{aligned} D_{\text{р}}^{\text{ср}} &= \frac{(D_{\text{пцд}} + D_{\text{ут}} + D_{\text{прод}}) (h'_{\text{пв}} - h'_{\text{д}})}{(h_{\text{р}}^{\text{ср}} - h'_{\text{пв}}) \eta_{\text{ТА}}} = \\ &= \frac{(638,77 + 15) \cdot (990,3 - 666,8)}{(2990 - 990,3) \cdot 0,98} = 107,92 \text{ т/ч.} \end{aligned}$$

Предварительный расход пара на турбину

$$D_{\text{т}} = D_{\text{пцд}} + D_{\text{р}}^{\text{ср}} = 638,77 + 107,92 = 746,69 \sim 746,7 \text{ т/ч.}$$

При номинальной нагрузке и при конечном давлении  $p_{\text{к}} = 1,47 \text{ МПа}$  турбина Р-100-130 согласно заводским данным имеет следующую характеристику:  $D_{\text{т}}^0 = 760 \text{ т/ч}$ ; давления и температуры в отборах:  $p_{\text{отб1}}^0 = 3,4 \text{ МПа}$ ;  $t_{\text{отб1}}^0 = 385 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $p_{\text{отб2}}^0 = 2,28 \text{ МПа}$ ;  $t_{\text{отб2}}^0 = 335 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $p_{\text{отб3}}^0 = 1,47 \text{ МПа}$ ;  $t_{\text{отб3}}^0 = 284 \text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Используя формулу Флюгеля, определяем давление в первом отборе при расходе пара на турбину  $D_T = 746,7$  т/ч и конечном давлении  $p_K = 1,0$  МПа:

$$p_{OTB1} = \sqrt{p_K^2 + \left(\frac{D_T}{D_T^0}\right)^2 [(p_{OTB1}^0)^2 - (p_K^0)^2]} =$$

$$= \sqrt{1,0^2 + \left(\frac{746,7}{760}\right)^2 [3,4^2 - 1,47^2]} = 3,17 \text{ МПа.}$$

На  $h-s$ -диаграмме находим  $h_{OTB1} = 3180$  кДж/кг (см. рис. 2.7);  $t_1'' = 236,9$  °С.

Принимаем недогрев  $\theta = 4,9$  °С, тогда температура питательной воды на входе в котел  $t_{ПВ} = 232$  °С.

Расход питательной воды

$$D_{ПВ} = D_T + D_{ПРОД} = 1,01D_T = 1,01 \cdot 746,7 = 754,167 \text{ т/ч.}$$

Расход продувочной воды  $D_{ПРОД} = 7,467$  т/ч.

Расчет сепаратора непрерывной продувки

$$d_{СЕП} = \frac{D_{ПРОД} (h'_{ПРОД} - h'_{СЕП})}{h''_{СЕП} - h'_{СЕП}} \text{ (см. задачу 14 на с. 68).}$$

где  $h'_{ПРОД} = 1565$  кДж/кг (при  $p_{KV} = 13,8$  МПа);  $h''_{СЕП} = 2755,5$  кДж/кг;  $h'_{СЕП} = 666,8$  кДж/кг.

$$d_{СЕП} = \frac{7,467 \cdot (1565 - 666,8)}{2755,5 - 666,8} = 3,21 \text{ т/ч.}$$

Количество продувочной воды, сливаемой в дренаж,

$$D'_{ПРОД} = D_{ПРОД} - d_{СЕП} = 7,467 - 3,21 = 4,257 \text{ т/ч.}$$

Температура добавочной химически очищенной воды после охладителя продувки

$$t_{ДОБ} = t_{ХОВ} + \frac{D_{ПРОД}}{D_{ДОБ}} (t_{СЕП} - t_{СЛ}) = 30 + \frac{4,257}{81 + 0,012 \cdot 747,7} (158 - 60) = 34,63 \text{ °С.}$$

Определяем интервал подогрева питательной воды в регенеративных подогревателях

$$\Delta t_{ПВ} = t_{ПВ} - t_{Д} = 232 - 158 = 74 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

При трехступенчатом равномерном подогреве питательной воды в каждой ступени

$$\Delta t_{ПВД} = 74 : 3 \sim 25 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Температура питательной воды перед ПВД

$$t'_1 = t_{ПВ} - \Delta t_{ПВД} = 232 - 25 = 207 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Расход пара на ПВД1

$$D_{ОТБ1} = \frac{D_{ПВ}(h'_{ПВ} - h'_1)}{(h_{ОТБ1} - h'_{ОТБ1})\eta_{ТА}} = \frac{754,167 \cdot (999,7 - 884,1)}{(3180 - 1023) \cdot 0,98} = 41,24 \text{ т/ч}.$$

Температура насыщения пара второго отбора

$$t_{ОТБ2}^H = t'_{ПВД1} + \Theta = 207 + 5 = 212 \text{ }^{\circ}\text{C};$$

давление отбора  $p_{ОТБ2} = 1,985 \text{ МПа}$ .

Проверка давления в камере второго отбора по формуле Флюгеля:

$$p_{ОТБ2} = \sqrt{p_K^2 + \left(\frac{D'_{ОТС}}{D_{ОТС}^0}\right)^2 [(p_{ОТБ2}^0)^2 - (p_K^0)^2]} =$$

$$= \sqrt{1,0^2 + \left(\frac{746,7 - 41,24}{760 - 41,24}\right)^2 (2,28^2 - 1,47^2)} = 1,981 \text{ МПа}.$$

С помощью  $h-s$ -диаграммы определяем энтальпию пара во втором отборе:  $h_{ОТБ2} = 3070 \text{ кДж/кг}$ ;  $h'_{ОТБ2} = 908 \text{ кДж/кг}$ . Температура воды перед подогревателем ПВД2  $t'_2 = t^B_{ОТБ3} - \theta = 180 - 4 = 176 \text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Уравнение теплового баланса ПВД2

$$D_{ПВ}(h'_1 - h'_2) = [D_{ОТБ2}(h_{ОТБ2} - h'_{ОТБ2}) + D_{ОТБ1}(h'_{ОТБ1} - h'_{ОТБ2})]\eta_{ТА}.$$

Отсюда

$$D_{\text{ОТБ2}} = \frac{D_{\text{ПВ}}(h'_1 - h'_2) + D_{\text{ОТБ1}}(h'_{\text{ОТБ1}} - h'_{\text{ОТБ2}})\eta_{\text{ТА}}}{(h_{\text{ОТБ2}} - h'_{\text{ОТБ2}})\eta_{\text{ТА}}} =$$

$$= \frac{754,167 \cdot (884,1 - 737) - 41,24 \cdot (1023 - 908) \cdot 0,98}{(3070 - 908) \cdot 0,98} = 50,15 \text{ т/ч.}$$

Температура насыщения пара третьего отбора  $t^H_{\text{ОТБ3}} = 180 \text{ }^\circ\text{C}$  ( $p_{\text{ОТБ3}} = 1,0 \text{ МПа}$ ). Энтальпия пара третьего отбора  $h_{\text{ОТБ3}} = 2930 \text{ кДж/кг}$ ;  $h'_{\text{ОТБ3}} = 764,2 \text{ кДж/кг}$ .

Расход пара из третьего отбора

$$D_{\text{ОТБ3}} = \frac{D_{\text{ПВ}}(h'_2 - h'_{\text{ПВ}}) - \eta_{\text{ТО}}[(D_{\text{ОТБ1}} + D_{\text{ОТБ2}})(h'_{\text{ОТБ2}} - h'_{\text{ОТБ3}})]}{(h_{\text{ОТБ3}} - h'_{\text{ОТБ3}})\eta_{\text{ТА}}},$$

где  $h'_{\text{ПВ}} = h'_d + \Delta h_{\text{ПН}}$  – энтальпия питательной воды за питательным насосом;

$$\Delta h_{\text{ПН}} = \frac{\Delta p_{\text{ПН}} v_{\text{СР}}}{\eta_{\text{ПН}}} = \frac{(15,0 - 0,588) \cdot 10^6 \cdot 0,0013}{0,75 \cdot 10^3} \sim 25 \text{ кДж/кг};$$

$$h'_{\text{ПВ}} = 666,8 + 25 = 692 \text{ кДж/кг.}$$

$$D_{\text{ОТБ3}} = \frac{754,167 \cdot (737 - 692) - 0,98 \cdot (41,24 + 50,15) \cdot (908 - 764,2)}{(2930 - 764,2) \cdot 0,98} = 11,260 \text{ т/ч.}$$

Тепловой баланс деаэратора

$$D_d h_k \eta_d + d_{\text{СЕП}} h''_{\text{СЕП}} + (D_{\text{ОТБ1}} + D_{\text{ОТБ2}} + D_{\text{ОТБ3}}) h'_{\text{ОТБ3}} +$$

$$+ D_{\text{ВК}} h'_{\text{ВК}} + D_{\text{ДОБ}} h'_{\text{ДОБ}} = (D_{\text{ПВ}} + D_{\text{УТ}}) h'_d;$$

$$D_d = \frac{(D_{\text{ПВ}} + D_{\text{УТ}}) h'_d - \sum D_{\text{ОТБ}} h'_{\text{ОТБ}} - d_{\text{СЕП}} h''_{\text{СЕП}} - D_{\text{ДОБ}} h'_{\text{ДОБ}} - D_{\text{ВК}} h'_{\text{ВК}}}{h_k \eta_d} =$$

$$= \frac{(754,167 + 8,96) \cdot 666,8 - 102,65 \cdot 764,2 - 3,21 \cdot 2755,5 - 89,96 \cdot 145 - 459 \cdot 293}{2930 \cdot 0,98} =$$

$$= 95,57 \text{ т/ч.}$$

Полный расход пара в турбине

$$D_T = D_{\text{ОТБ1}} + D_{\text{ОТБ2}} + D_{\text{ОТБ3}} + D_d + D_{\text{ВЛ}} =$$

$$= 41,24 + 50,15 + 11,26 + 95,57 + 540 = 738,22 \text{ т/ч.}$$

По сравнению с первоначально принятым расходом пара расхождение составляет

$$\Delta D_T = \frac{746,7 - 738,22}{746,7} \cdot 100 = 1,1 \%$$

Дальнейшей корректировки расхода пара не делаем (расхождение допускается до 2 %).

Электрическая мощность турбины

$$\begin{aligned} N_{\Sigma} &= \sum D_i \Delta h_i \eta_{\Sigma} = [D_{\text{ОТБ1}} \Delta h_1 + D_{\text{ОТБ2}} \Delta h_2 + D_{\text{ОТБ3}} \Delta h_3 + (D_{\text{Д}} + D_{\text{ВП}}) H_i] \eta_{\Sigma} = \\ &= [41,24 \cdot 320 + 50,15 \cdot 430 + 11,26 \cdot 570 + (95,57 + 540) \cdot 570] \times \\ &\quad \times 0,97 \frac{1000}{3600} = 108,7 \text{ МВт.} \end{aligned}$$

Перегрузка турбины вызвана завышенным расходом пара внешним потребителем при пониженном (против расчетного) противодавлении.

**Задача 6.** Определить расход пара на турбину номинальной электрической мощностью  $N_{\Sigma} = 60$  МВт, отпускающей из отбора пар в количестве  $D_{\text{ОТБ}} = 120$  т/ч (рис. 2.8). Давление в отборе  $p_{\text{П}} = 1,0$  МПа; начальные параметры пара перед турбиной  $p_0 = 12,7$  МПа,  $t_0 = 540$  °С. Давление в конденсаторе турбины  $p_{\text{К}} = 4$  кПа. Средний внутренний относительный КПД турбины  $\eta_{\text{Оi}} = 0,85$ ; электромеханический КПД турбогенератора  $\eta_{\Sigma} = 0,98$ .

**Решение.** По известным значениям  $p_0$  и  $t_0$  и  $h$ - $s$ -диаграмме определяем энтальпию  $h_0 = 3440$  кДж/кг.

На пересечении линии  $s_0 = \text{const}$  и давления в конденсаторе  $p_{\text{К}} = 4$  кПа находим энтальпию пара в конце изоэнтропного расширения  $h_{\text{КС}} = 1980$  кДж/кг.

Располагаемый теплоперепад пара на турбину составляет

$$\Delta h_S = h_0 - h_{\text{КС}} = 3440 - 1980 = 1460 \text{ кДж/кг.}$$

Действительный теплоперепад пара на турбине

$$\Delta h = \Delta h_S \eta_{\text{Оi}} = 1460 \cdot 0,85 = 1241 \text{ кДж/кг.}$$

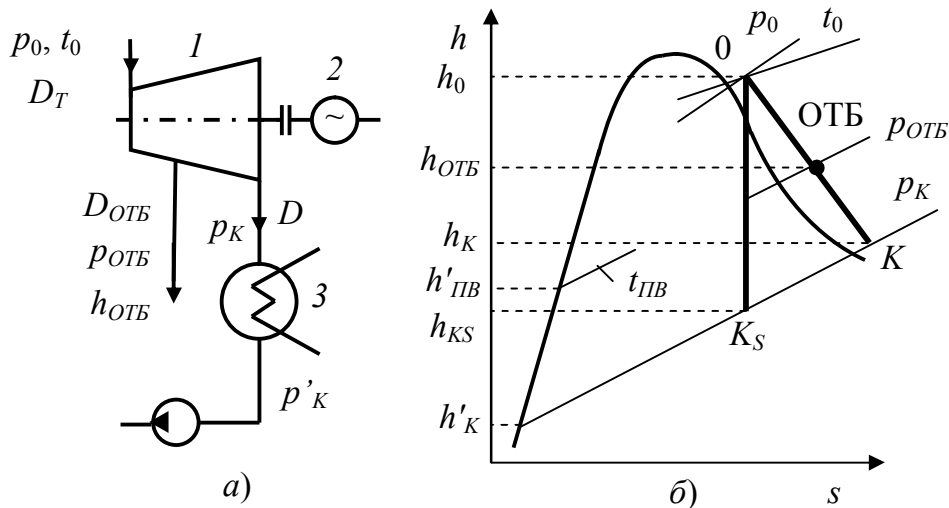


Рис. 2.8. Паротурбинная установка: а – схема; б – процесс расширения в диаграмме; 1 – турбина; 2 – электрогенератор; 3 – конденсатор

Энтальпия пара в конце действительного процесса расширения (в конденсаторе)

$$h_K = h_0 - \Delta h = 3440 - 1241 = 2200 \text{ кДж/кг.}$$

Параметры пара в конце действительного процесса определяются точкой  $K$ , которая лежит на пересечении линий  $h_K$  и  $p_K$ .

Процесс  $0-K$  – действительный процесс расширения пара в турбине.

Действительная энтальпия газа в отборе определяется пересечением линии процесса  $0-K$  и давлением пара  $p_{II} = 1,0$  МПа. Энтальпия  $h_{OTB} = 2962$  кДж/кг.

Коэффициент недовыработки мощности отборным паром

$$y = \frac{h_{OTB} - h_K}{h_0 - h_K} = \frac{2962 - 2200}{3440 - 2200} = 0,614.$$

Расход пара на турбину

$$D_T = \frac{N_{\mathcal{E}} \cdot 3600}{(h_0 - h_{KS}) \eta_{oi} \eta_{\mathcal{EM}}} + y D_{OTB} = \frac{60 \cdot 10^3 \cdot 3600}{(3340 - 1980) \cdot 0,85 \cdot 0,98} + 0,614 \cdot 120 \cdot 10^3 = 251,28 \cdot 10^3 \text{ кг/ч} = 251,28 \text{ т/ч.}$$

**Задача 7.** Определить расход греющего пара  $G_{\Pi}$  атмосферного смешивающего деаэрата (рис. 2.9) (давление  $p_{\Pi} = 2 \cdot 10^5$  Па, температура  $t_{\Pi} = 130$  °С), если конечная температура деаэрированной воды  $100$  °С и в деаэрате нагревается:

– поток турбинного конденсата  $G_{\text{ТК}} = 6$  кг/с с температурой  $t_{\text{ТК}} = 30$  °С и  $p_{\text{ТК}} = 3 \cdot 10^5$  Па;

– поток химически очищенной воды  $G_{\text{ХО}} = 7$  кг/с, температурой  $t_{\text{ХО}} = 40$  °С и  $p_{\text{ХО}} = 5 \cdot 10^5$  Па.

Потеря теплоты деаэратом в окружающую среду 5 % .

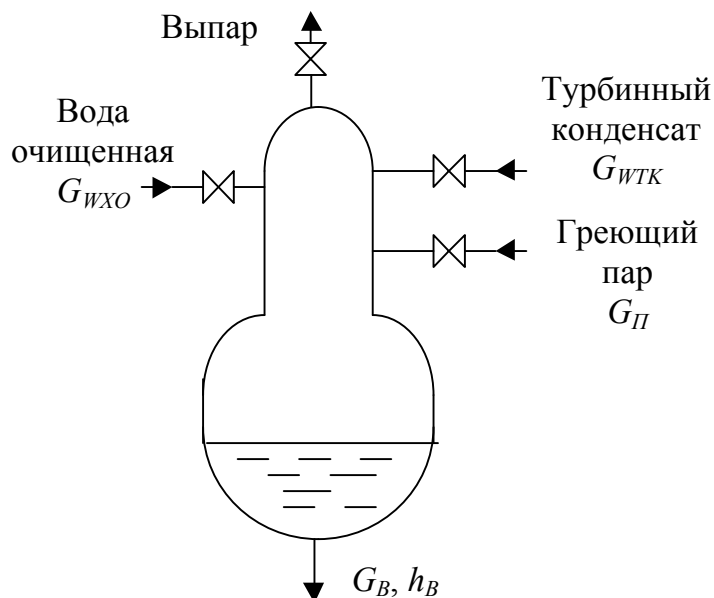


Рис. 2.9. Деаэратор

**Решение.** Тепловой расчет деаэрата основывается на составлении и решении уравнений материального и теплового балансов.

1. Энтальпию греющего пара определяем по  $p_{\Pi}$ ,  $t_{\Pi}$  и таблицам термодинамических свойств воды и водяного пара (ТСВВП) –  $h_{\Pi} = 2727,5$  кДж/кг.

2. Энтальпию турбинного конденсата определяем по  $p_{\text{ТК}}$ ,  $t_{\text{ТК}}$  и таблицам ТСВВП –  $h_{\text{ТК}} =$

$= 125,9$  кДж/кг.

3. Энтальпию химически очищенной воды определяем по  $p_{\text{ХО}}$ ,  $t_{\text{ХО}}$  и таблицам ТСВВП –  $h_{\text{ХО}} = 167,8$  кДж/кг.

4. Энтальпию деаэрированной воды определяем по давлению  $p_B = 1 \cdot 10^5$  Па,  $t_B = 100$  °С и таблицам ТСВВП –  $h_B = 419$  кДж/кг.

5. Тепловой баланс деаэрата составит

$$(G_{\Pi} h_{\Pi} + G_{\text{ТК}} h_{\text{ТК}} + G_{\text{ХО}} h_{\text{ХО}}) \eta = (G_{\Pi} + G_{\text{ТК}} + G_{\text{ХО}}) h_B$$

или

$$(G_{\Pi} \cdot 2727,5 + 6 \cdot 125,9 + 7 \cdot 167,8) \cdot 0,95 = (G_{\Pi} + 6 + 7) \cdot 419.$$

Откуда  $G_{\Pi} = 1,59$  кг/с.

### Контрольная задача для самостоятельного решения.

Определить расход греющего пара  $G_{II}$  атмосферного смешивающего деаэратора (давление  $p_{II}$ , температура  $t_{II}$ ), если конечная температура деаэрированной воды  $100^{\circ}\text{C}$  и в деаэраторе нагревается:

- поток турбинного конденсата  $G_{WTK}$  с температурой  $t_{TK}$  и  $p_{TK}$ ;
  - поток химически очищенной воды  $G_{WХО}$  с температурой  $t_{ХО}$  и  $p_{ХО}$ .
- Потеря теплоты деаэратором в окружающую среду 5 % .

Таблица 2.5

### Варианты контрольных заданий

Параметры	Варианты заданий									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$p_{II}$ , МПа	0,2	0,2	0,2	0,2	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
$t_{II}$ , $^{\circ}\text{C}$	125	130	135	140	130	135	140	145	135	140
$p_{TK}$ , МПа	0,3	0,3	0,3	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35
$t_{TK}$ , $^{\circ}\text{C}$	40	45	30	35	40	45	30	35	40	45
$p_{ХО}$ , МПа	0,45	0,45	0,45	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,45
$t_{ХО}$ , $^{\circ}\text{C}$	30	35	40	30	35	40	30	35	40	45
$G_{WTK}$ , кг/с	6	4	5	5	6	4	4	5	6	4
$G_{WХО}$ , кг/с	7	5	6	6	7	5	5	6	7	5

**Задача 8.** Для подачи потребителю пара в сухом насыщенном состоянии давлением  $p_3 = 6 \cdot 10^5$  Па используется пар, вырабатываемый котлами при  $p_1 = 40 \cdot 10^5$  Па и  $t_1 = 350^{\circ}\text{C}$  (рис. 2.10). После дросселирования пар пропускается через поверхностный пароохладитель, где происходит его охлаждение при неизменном давлении. Сколько теплоты за 1 сек отводится от пара в охладителе, если расход его составляет  $G = 1,4$  кг/с.

**Решение.** Начальное состояние пара, вырабатываемого котлами, определяется точкой 1, после дросселирования – точкой 2 и направляемого потребителю – точкой 3 (рис. 2.11).

Поскольку охлаждение пара в поверхностном охладителе происходит при  $p = \text{const}$ , то отводится теплота, равная

$$Q = G (h_2 - h_3) = 1,4 (3088 - 2760) = 460 \text{ кДж/кг.}$$

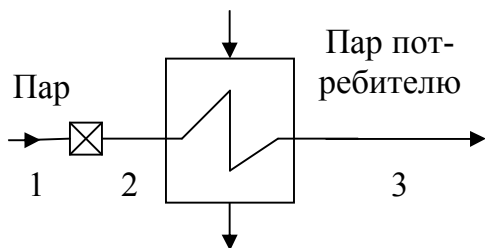


Рис. 2.10. Поверхностный пароохлаждитель

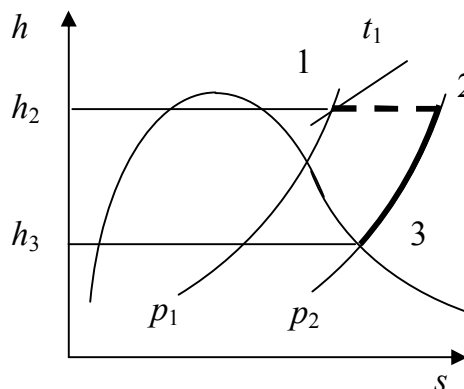


Рис. 2.11. Процессы обработки пара

### Контрольная задача для самостоятельного решения.

Для подачи потребителю пара в сухом насыщенном состоянии давлением  $p_3$  используется пар, вырабатываемый котлами при  $p_1$  и  $t_1$ . После дросселирования пар пропускается через поверхностный пароохлаждитель, где происходит его охлаждение при неизменном давлении. Сколько теплоты за 1 сек отводится от пара в охладителе, если расход его составляет  $G$ ?

Таблица 2.6

#### Варианты контрольных заданий

Параметры	Варианты заданий									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$p_3$ , МПа	0,5	0,55	0,6	0,65	0,65	0,6	0,55	0,5	0,7	0,75
$p_1$ , МПа	4,0	4,0	4,0	4,0	4,5	4,5	4,5	4,5	5,0	5,0
$t_1$ , °С	300	350	400	450	300	350	400	450	350	400
$G$ , кг/с	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8

**Задача 9.** В установке для подогрева сетевой воды (система теплофикации) имеются пиковые (а) и основные (б) подогреватели (рис. 5.12). Первые обогреваются паром, имеющим давление  $p_1 = 5 \cdot 10^5$  Па и температуру  $250$  °С, а вторые – паром  $p_2 = 1,2 \cdot 10^5$  Па и температурой  $130$  °С. Конденсат пиковых подогревателей направляется в основные, где происходит частичное использование его энтальпии. Определить расход пара на пиковые и основные подогреватели, если:

1) массовый расход воды, которую следует подогреть,  $G_W = 8$  кг/с; вода в установке подогревается с  $t_3 = 60$  °С до  $t_5 = 110$  °С;

2) разность между температурой воды, выходящей из основных подогревателей, и температурой насыщения обогревающего их пара  $\Delta t = 8$  °С;

3) КПД подогревателей  $\eta = 98 \%$ .

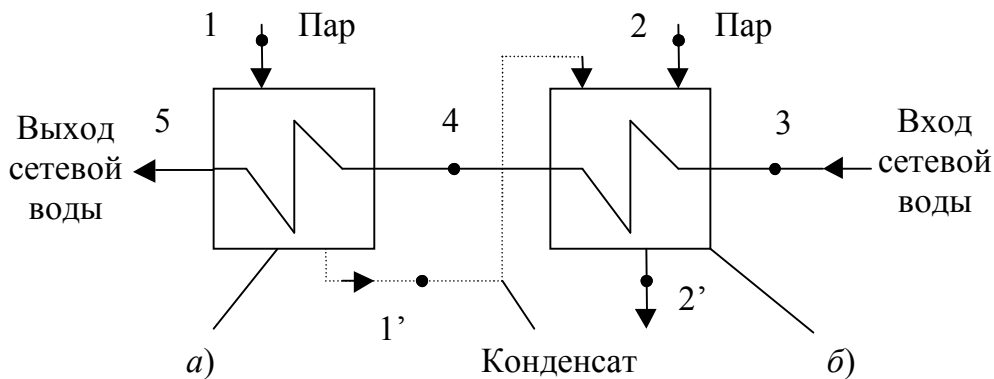


Рис. 2.12. Подогреватели сетевой воды: *a* – пиковый; *б* – основной

**Решение.** Температура насыщения пара при  $p_2 = 1,2 \cdot 10^5$  Па,  $t_2'' = 104,81$  °С, следовательно, при входе в пиковые подогреватели сетевая вода будет иметь температуру

$$t_4 = t_2'' - \Delta t = 104,81 - 8 = 96,81 \text{ °С.}$$

Энтальпия пара при  $p_1 = 5 \cdot 10^5$  Па и температуре 250 °С равна  $h_1 = 2958$  кДж/кг.

Энтальпия кипящей воды при  $p_1 = 5 \cdot 10^5$  Па –  $h_1' = 640,1$  кДж/кг.

Уравнение теплового баланса пикового подогревателя

$$G_W (t_5 - t_4) c_W = G_1 \eta (h_1 - h_1'),$$

где  $c_W = 4,1868$  кДж/(кг·К) – теплоемкость воды.

Расход пара на пиковые подогреватели составляет

$$G_1 = \frac{G_W (t_5 - t_4) c_W}{\eta (h_1 - h_1')} = \frac{8 \cdot (110 - 96,81) \cdot 4,1868}{0,98 \cdot (2958 - 640,1)} = 0,195 \text{ кг/с.}$$

Энтальпия пара при  $p_2 = 1,2 \cdot 10^5$  Па и температуре 130 °С равна  $h_2 = 2735$  кДж/кг.

Энтальпия кипящей воды при  $p_2 = 1,2 \cdot 10^5$  Па –  $h_2' = 439,4$  кДж/кг.

Суммарный теплосъем с основных подогревателей равен

$$q_{оп} = G_W (t_4 - t_3) c_W = 8 \cdot (96,81 - 60) \cdot 4,1868 = 1234 \text{ кДж/кг,}$$

из которых на конденсат пиковых подогревателей приходится

$$q' = \eta G_1 (h_1' - h_2') = 0,98 \cdot 0,195 \cdot (640 - 439,4) = 38,2 \text{ кДж/с}$$

и на пар при  $p_2 = 1,2 \cdot 10^5$  Па

$$q_{оп} - q' = 1234 - 38,2 = 1195,8 \text{ кДж/с.}$$

Расход пара на основные подогреватели

$$G_2 = \frac{q_{оп} - q'}{\eta(h_2 - h_2')} = \frac{1195,8}{0,98 \cdot (2735 - 439,4)} = 0,531 \text{ кг/с.}$$

### Контрольная задача для самостоятельного решения.

В установке для подогрева сетевой воды (система теплофикации) (рис. 2.12) имеются пиковые (*a*) и основные (*b*) подогреватели. Первые обогреваются паром, имеющим давление  $p_1$  и температуру  $t_1$ , а вторые – паром  $p_2$  и температурой  $t_2$ . Конденсат пиковых подогревателей направляется в основные, где происходит частичное использование его энтальпии. Определить расход пара на пиковые и основные подогреватели, если:

- 1) массовый расход воды, которую следует подогреть,  $G_w$ ; вода в установке подогревается с  $t_3$  до  $t_5$ ;
- 2) разность между температурой воды, выходящей из основных подогревателей, и температурой насыщения обогревающего их пара  $\Delta t = 8$  °С;
- 3) КПД подогревателей  $\eta$ .

Таблица 2.7

### Варианты контрольных заданий

Параметры	Варианты заданий									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$p_1$ , МПа	0,5	0,55	0,6	0,5	0,55	0,6	0,5	0,55	0,65	0,7
$t_1$ , °С	300	300	300	350	350	350	350	350	400	400
$p_2$ , МПа	0,12	0,13	0,14	0,15	0,12	0,13	0,14	0,15	0,13	0,15
$t_2$ , °С	120	125	130	135	120	130	130	135	125	135
$G_w$ , кг/с	4	5	6	7	8	4	5	6	7	8
$t_3$ , °С	60	70	80	50	60	70	80	60	70	80
$t_5$ , °С	110	120	130	100	110	120	130	110	120	130
$\eta$ , %	96	97	98	96	97	98	96	97	98	96

**Задача 10.** В поверхностном подогревателе (рис. 2.13) производится регенеративный подогрев питательной воды греющим паром, отобранном из турбины при  $p_{II} = 0,66$  МПа и степени сухости  $x_{II} = 0,94$ . Конденсат выходит с температурой на  $\Delta t = 2,0$  °С ниже, чем температура насыщения при  $p_{II}$ . Питательная вода, подаваемая

насосом при  $p_{B2} = 10$  МПа, имеет на входе  $t_{B1} = 110$  °С и на выходе  $t_{B2} = 155$  °С. Определить количество пара, необходимое для подогрева 1 кг питательной воды.

**Решение.** Теплота, отданная паром,  $Q_{\Pi}$  равна теплоте, принятой водой,  $Q_B$ :

$$Q_{\Pi} = Q_B;$$

$$Q_{\Pi} = m_{\Pi} \Delta h = m_{\Pi} (h_{\Pi} - h_K);$$

$$Q_B = m_B c_{PB} \Delta t_B = m_B c_{PB} (t_{B2} - t_{B1}).$$

Из последних уравнений

$$a = \frac{m_{\Pi}}{m_B} = \frac{c_{PB} (t_{B2} - t_{B1})}{h_{\Pi} - h_K}.$$

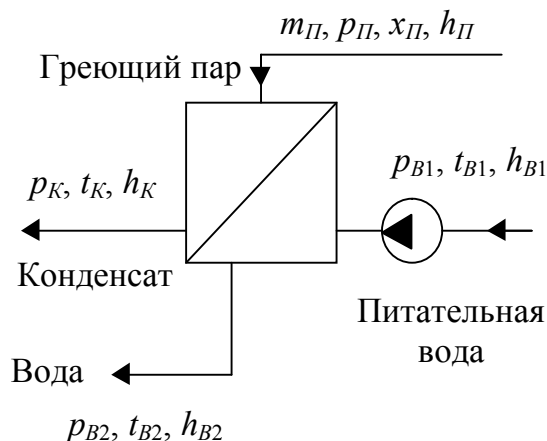


Рис. 2.13. Поверхностный подогреватель

По  $p_{\Pi}$ ,  $x_{\Pi}$  и  $h$ - $s$ -диаграмме определяем энтальпию пара  $h_{\Pi} = 2620$  кДж/кг.

По таблицам термодинамических свойств воды и водяного пара (ТСВВП) и давлению пара  $p_{\Pi}$  определяем температуру насыщения  $t' = 162,6$  °С.

Температура конденсата  $t_K$  на 2 °С ниже  $t'$ ,  $t_K = 160,6$  °С.

По таблицам ТСВВП и  $t_K = 160,6$  °С находим энтальпию насыщенной жидкости  $h_K = 677$  кДж/кг.

Массовую изобарную теплоемкость воды определяем по таблицам ТСВВП. При  $p = 10$  МПа и  $t_{CP} = 130$  °С  $c_{PB} = 4,238$  кДж/(кг·К).

$$a = \frac{m_{\Pi}}{m_B} = \frac{c_{PB} (t_{B2} - t_{B1})}{h_{\Pi} - h_K} = \frac{4,238 \cdot (155 - 110)}{2620 - 677} = 0,098 \text{ кг/кг.}$$

### Контрольная задача для самостоятельного решения.

В поверхностном подогревателе (рис. 2.13) производится регенеративный подогрев питательной воды греющим паром, отобранном из турбины при  $p_{\Pi}$  и степени сухости  $x_{\Pi}$ . Конденсат выходит с температурой на  $\Delta t = 2,0$  °С ниже, чем температура насыщения при  $p_{\Pi}$ . Питательная вода, подаваемая насосом при  $p_{B2}$ , имеет на входе  $t_{B1}$  и на выходе  $t_{B2}$ . Определить количество пара, необходимое для подогрева 1 кг питательной воды.

## Варианты контрольных заданий

Параметры	Варианты заданий									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$p_{II}$ , МПа	0,50	0,55	0,60	0,65	0,70	0,50	0,55	0,60	0,65	0,70
$x$	0,90	0,92	0,94	0,90	0,92	0,94	0,96	0,90	0,92	0,96
$p_{B2}$ , МПа	0,8	0,9	1,0	1,1	0,8	0,9	1,0	1,1	0,8	0,9
$t_{B1}$ , °С	100	110	120	105	115	100	110	105	115	110
$t_{B2}$ , °С	145	155	165	150	160	145	155	150	160	155

**Задача 11.** Во избежание больших потерь конденсата пара из отбора турбины на электростанции установлен паропреобразователь (рис. 2.14).

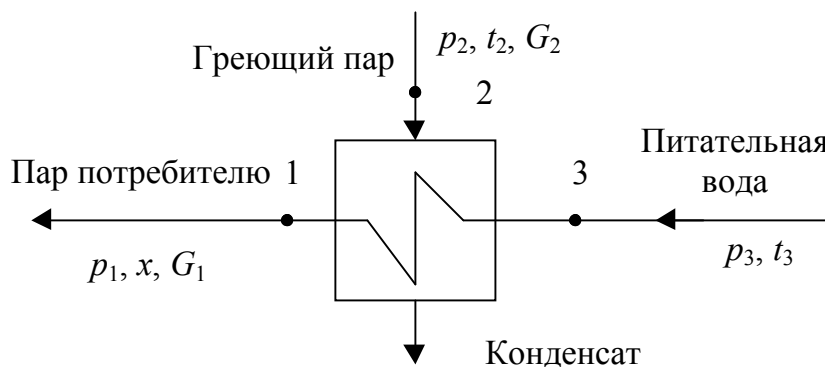


Рис. 2.14. Паропреобразователь

Параметры пара, направляемого на производство из паропреобразователя,  $p_1 = 4 \cdot 10^5$  Па, степень сухости пара  $x = 0,98$ . Греющий пар имеет давление  $p_2 = 6 \cdot 10^5$  Па и температуру  $t_2 = 220$  °С. Пита-

тельная вода поступает в паропреобразователь с давлением  $p_3 = 5 \cdot 10^5$  Па и температурой  $t_3 = 60$  °С. Масса пара, направляемая на производство  $G_1 = 5,5$  кг/с. Определить массовый расход греющего пара  $G_2$  и его испарительную способность при условиях, что в паропреобразователе не должно происходить переохладение конденсата, а потери в окружающую среду составляют 3 %.

**Решение.** По таблицам термодинамических свойств воды и водяного пара (ТСВВП) и давления  $p_1 = 4 \cdot 10^5$  Па находим энтальпию жидкости  $h' = 604,7$  кДж/кг и теплоту парообразования  $r = 2134$  кДж/кг.

Энтальпия пара, направляемого на производство, равна

$$h_1 = h' + x r = 604,7 - 0,98 \cdot 2133 = 2698 \text{ кДж/кг.}$$

По таблицам ТСВВП при  $p_3 = 5 \cdot 10^5$  Па и  $t_3 = 60$  °С энтальпия питательной воды  $h'_3 = 251,4$  кДж/кг.

По таблицам ТСВВП, давлению  $p_2 = 6 \cdot 10^5$  Па и  $t_2 = 220$  °С энтальпия греющего пара  $h_2 = 2891$  кДж/кг.

По таблицам ТСВВП и давлению насыщения  $p_2 = 6 \cdot 10^5$  Па энтальпия конденсата греющего пара  $h'_2 = 670,5$  кДж/кг.

Массовый расход греющего пара определяется из уравнения теплового баланса паропреобразователя

$$G_2 \eta (h_2 - h'_2) = G_1 (h_1 - h'_3),$$

$$G_2 = \frac{G_1 (h_1 - h'_3)}{\eta (h_2 - h'_2)} = \frac{5,5(2698 - 251,4)}{0,97(2891 - 670,5)} = 6,25.$$

Испарительная способность греющего пара будет равна

$$U = G_1 / G_2 = 5,5 / 6,25 = 0,88 \text{ кг/кг.}$$

### Контрольная задача для самостоятельного решения.

Во избежание больших потерь конденсата пара из отбора турбины на электростанции установлен паропреобразователь (рис. 2.14). Параметры пара, направляемого на производство из паропреобразователя,  $p_1$ , степень сухости пара  $x$ . Греющий пар имеет давление  $p_2$  и температуру  $t_2$ . Питательная вода поступает в паропреобразователь с давлением  $p_3$  и температурой  $t_3 = 60$  °С. Масса пара, направляемая на производство  $G_1$ . Определить массовый расход греющего пара  $G_2$  и его испарительную способность при условиях, что в паропреобразователе не должно происходить переохлаждение конденсата, а потери в окружающую среду составляют 3 %.

Таблица 2.9

### Варианты контрольных заданий

Параметры	Варианты заданий									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$p_1$ , МПа	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,6
$x$	0,96	0,97	0,98	0,96	0,97	0,98	0,96	0,97	0,98	0,96
$p_2$ , МПа	0,6	0,7	0,8	0,6	0,7	0,8	0,7	0,8	0,6	0,8
$t_2$ , °С	240	250	270	250	270	290	260	260	260	280
$p_3$ , МПа	55	60	65	70	55	60	65	70	55	60
$G_1$ , кг/с	4	4,5	5	5,5	6	4	4,5	5	5,5	6,0

**Задача 12.** Определить расход пара в поверхностном пароводяном теплообменнике (рис. 2.15) для подогрева сетевой воды с  $t_0 = 50$  °С до  $t_{II} = 120$  °С. Расход сетевой воды  $W_{CB} = 480$  т/ч. Параметры пара в

отборе  $p_{OTB} = 0,25$  МПа;  $t_{OTB} = 200$  °С. Конденсат пара не переохлаждается.

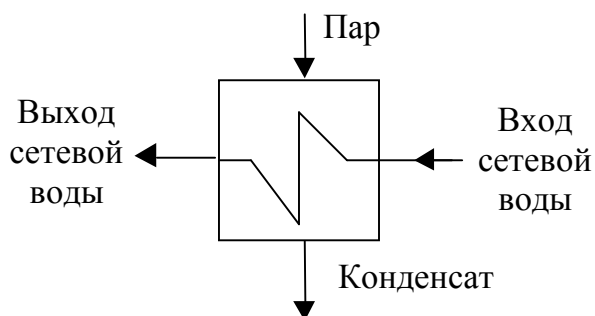


Рис. 2.15. Поверхностный теплообменник

**Решение.** Уравнение теплового баланса подогревателя:

$$G_{OTB} (h_{OTB} - h'_{OTB}) \eta_{TA} = W_{CB} (t_{II} - t_O) c_P.$$

По таблицам свойств воды и водяного пара или с помощью  $h-s$ -диаграммы находим  $h_{OTB} = 2870$  кДж/кг;

$$h'_{OTB} = 127,4 \text{ кДж/кг};$$

$$G_{OTB} = \frac{480 \cdot (120 - 50) \cdot 4,19}{(2870 - 127,4) \cdot 0,98} = 52,38 \text{ т/ч}.$$

### Контрольная задача для самостоятельного решения.

Определить расход пара в поверхностном пароводяном теплообменнике (рис. 2.15) для подогрева сетевой воды с  $t_O$  до  $t_{II}$ . Расход сетевой воды  $W_{CB}$ . Параметры пара в отборе  $p_{OTB}$ ;  $t_{OTB}$ . Конденсат пара не переохлаждается.

Таблица 2.10

### Варианты контрольных заданий

Параметры	Варианты заданий									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$t_O, \text{ }^\circ\text{C}$	40	45	50	55	40	45	50	55	40	45
$t_{II}, \text{ }^\circ\text{C}$	110	120	105	105	110	115	120	125	110	120
$p_{OTB}, \text{ МПа}$	0,22	0,24	0,26	0,28	0,3	0,22	0,24	0,26	0,28	0,3
$t_{OTB}, \text{ }^\circ\text{C}$	200	210	220	200	210	220	200	210	220	200
$W_{CB}, \text{ т/ч}$	400	420	440	460	480	500	400	420	440	460

**Задача 13.** Рассчитать двухступенчатую сетевую подогревательную установку (рис. 2.16) для следующих исходных данных: тепловая нагрузка сетевой подогревательной установки  $Q_{СП} = 50$  МВт; давление греющего пара в верхнем сетевом подогревателе  $p_{СП1} = 0,25$  МПа;  $t_{СП1} = 200$  °С; параметры пара в нижнем сетевом подогревателе  $p_{СП2} = 0,1$  МПа;  $t_{СП2} = 120$  °С, обратной сетевой воды  $t_O = 65$  °С. Конденсат пара не переохлаждается.

**Решение.** Расход сетевой воды

$$W_{CB} = \frac{Q_{СП}}{h'_{II} - h'_O} \approx \frac{Q_{СП}}{(t_{II} - t_O)c_P} = \frac{50 \cdot 10^3}{(120 - 65) \cdot 4,19} = 217,0 \text{ кг/с} = 781 \text{ т/ч.}$$

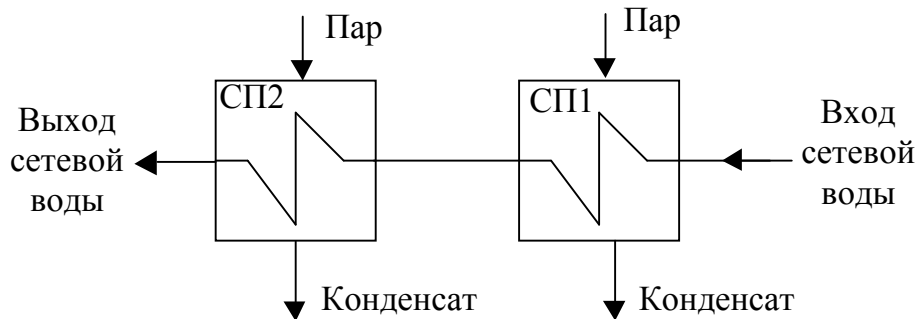


Рис. 2.16. Двухступенчатая сетевая подогревательная установка:

СП1 – сетевой подогреватель первой ступени;

СП2 – сетевой подогреватель второй ступени

Принимая недогрев сетевой воды до температуры насыщения в нижнем сетевом подогревателе  $\theta = 5^\circ\text{C}$ , определяем температуру сетевой воды за нижним сетевым подогревателем:

$$t'_{СП} = t_{СП1}^H - \theta = 100 - 5 = 95^\circ\text{C.}$$

Тепловые нагрузки сетевых подогревателей:

$$Q_{СП1} = W_{CB}(t'_{СП} - t_O)c_P = 217 \cdot (95 - 65) \cdot 4,19 \cdot 10^{-3} = 27,27 \text{ МВт};$$

$$Q_{СП2} = W_{CB}(t_{II} - t'_{СП})c_P = 217 \cdot (120 - 95) \cdot 4,19 \cdot 10^{-3} = 22,73 \text{ МВт.}$$

Проверка:

$$Q_{СП2} = Q_{СП} - Q_{СП1} = 50,0 - 27,27 = 22,73 \text{ МВт.}$$

Энтальпия пара в нижнем подогревателе  $h_{СП1} = 2780$  кДж/кг (по термодинамическим таблицам свойств воды и водяного пара).

Расход пара в нижний сетевой подогреватель

$$D_{СП1} = \frac{Q_{СП1}}{(h_{СП1} - h'_{СП1})\eta_{ТА}} = \frac{27270}{(2780 - 419) \cdot 0,98} = 11,786 \text{ кг/с} = 42,43 \text{ т/ч.}$$

Энтальпия пара в верхнем подогревателе  $h_{СП2} = 2870$  кДж/кг (по термодинамическим таблицам свойств воды и водяного пара).

Расход пара в верхний сетевой подогреватель

$$D_{СП2} = \frac{Q_{СП2}}{(h_{СП2} - h'_{СП2})\eta_{ТА}} = \frac{22730}{(2870 - 533,8) \cdot 0,98} = 9,93 \text{ кг/с} = 35,74 \text{ т/ч.}$$

### Контрольная задача для самостоятельного решения.

Рассчитать двухступенчатую сетевую подогревательную установку (рис. 2.16) для следующих исходных данных: тепловая нагрузка сетевой подогревательной установки  $Q_{СП}$ ; давление греющего пара в верхнем сетевом подогревателе  $p_{СП2}$ ;  $t_{СП2}$ ; параметры пара в нижнем сетевом подогревателе  $p_{СП1} = 0,1$  МПа;  $t_{СП1}$ , обратной сетевой воды  $t_o$ . Конденсат пара не переохлаждается.

Таблица 2.11

#### Варианты контрольных заданий

Параметры	Варианты заданий									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$p_{СП2}$ , МПа	0,24	0,26	0,28	0,30	0,32	0,24	0,26	0,28	0,30	0,32
$t_{СП2}$ , °С	180	190	200	210	220	220	200	190	180	220
$t_{СП1}$ , °С	110	115	120	125	130	110	115	120	125	130
$t_o$ , °С	40	45	50	55	60	65	60	55	50	45
$Q_{СП}$ , МВт	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70

**Задача 14.** Определить температуру химически очищенной воды ( $t'_{ХОВ}$ ) и выход пара из сепаратора непрерывной продувки котла  $d_{СЕП}$ , если известно  $D_{ПРОД} = 3,0$  т/ч (рис. 2.17); давление в барабане котла  $p_B = 14$  МПа; давление в сепараторе  $p_{СЕП} = 0,7$  МПа; расход химически очищенной воды  $D_{ХОВ} = 2,8$  т/ч; температура химически очищенной воды  $t_{ХОВ} = 30$  °С. Продувочная вода после подогревателя химически очищенной воды с температурой  $t'_{ПРОД} = 57$  °С сбрасывается в дренаж.

**Решение.** По давлению в барабане котла определяем энтальпию продувочной воды  $h'_{ПРОД} = 1572,3$  кДж/кг.

Тепловой баланс сепаратора

$$\begin{aligned} D_{ПРОД} h'_{ПРОД} \eta_{СЕП} &= \\ &= d_{СЕП} h''_{СЕП} + D'_{ПРОД} h'_{СЕП} \eta_{СЕП}. \end{aligned}$$

Материальный баланс сепаратора

$$D_{ПРОД} = d_{СЕП} + D'_{ПРОД}.$$

Из совместного решения этих уравнений

$$d_{СЕП} = \frac{D_{ПРОД} (h'_{ПРОД} - h'_{СЕП}) \eta_{СЕП}}{h''_{СЕП} - h'_{СЕП}};$$

$$h''_{СЕП} = 2765 \text{ кДж/кг}; h'_{СЕП} = 696,8 \text{ кДж/кг (при } p_{СЕП} = 0,7 \text{ МПа)};$$

$$d_{СЕП} = \frac{3,0 \cdot (1572,3 - 696,8) \cdot 0,98}{2765 - 696,8} = 1,2445 \text{ т/ч} \approx 1,24 \text{ т/ч.}$$

Количество сбрасываемой продувочной воды  $D_{ПРОД} = 3,0 - 1,24 = 1,76$  т/ч.

Количество теплоты, сбрасываемой с продувочной водой,

$$\begin{aligned} Q'_{ПРОД} &= D_{ПРОД} (h'_{СЕП} - t'_{ПРОД} \cdot c_P) = \\ &= 1,75 \cdot (696,8 - 57 \cdot 4,19) \cdot 10^3 = \\ &= 803,9 \cdot 10^3 \text{ кДж/ч}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} t'_{ХОВ} &= t_{ХОВ} + \frac{Q'_{ПРОД}}{D_{ХОВ} \cdot c_P} = \\ &= 30 + \frac{803,9 \cdot 10^3}{2,8 \cdot 10^3 \cdot 4,19} = 98,5 \text{ } ^\circ\text{C.} \end{aligned}$$

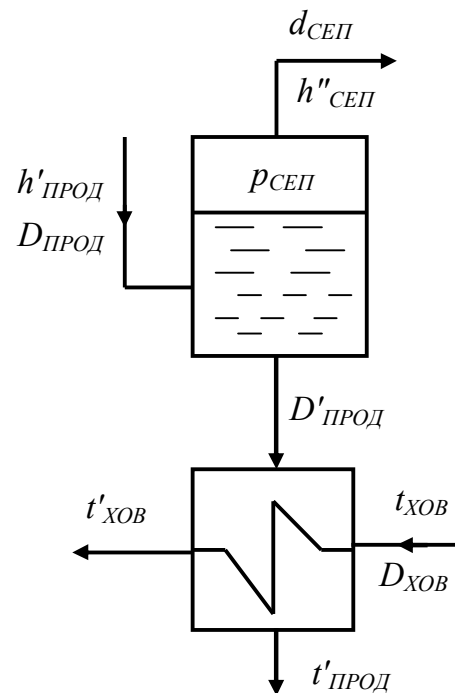


Рис. 2.17. Одноступенчатый сепаратор непрерывной продувки

### Контрольная задача для самостоятельного решения.

Определить температуру химически очищенной воды  $t'_{ХОВ}$  (рис. 2.17) и выход пара из сепаратора непрерывной продувки котла  $d_{СЕП}$ , если известно: количество сбрасываемой продувочной воды  $D_{ПРОД}$ ; давление в барабане котла  $p_B$ ; давление в сепараторе  $p_{СЕП}$ ; расход химически очищенной воды  $D_{ХОВ}$ ; температура химически очищенной воды  $t_{ХОВ} = 30$  °С. Продувочная вода после подогревателя химически очищенной воды с температурой  $t'_{ПРОД}$  сбрасывается в дренаж.

## Варианты контрольных заданий

Параметры	Варианты заданий									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$D_{\text{ПРОД}}$ , т/ч	2,4	2,6	2,8	3,0	3,2	3,4	2,4	2,6	2,8	3,0
$p_B$ , МПа	12	13	14	15	12	13	14	15	16	15
$p_{\text{СЕП}}$ , МПа	0,6	0,65	0,70	0,75	0,80	0,6	0,65	0,70	0,75	0,80
$D_{\text{ХОВ}}$ , т/ч	2,2	2,4	2,8	3,0	3,2	2,2	2,4	2,8	3,0	3,2
$t'_{\text{ПРОД}}$ , °С	50	52	54	56	58	56	50	52	54	56

## 2.2. Расчет газотурбинных установок

**Задача 15.** Определить термический КПД цикла газовой турбины (рис. 2.18) с подводом теплоты по изобаре и температуру  $T_3$ , если даны  $p_1 = 1$  бар,  $T_1 = 273$  К,  $p_2 = 9$  бар, степень сжатия  $v_3/v_2 = 1,5$ , а рабочее вещество – 1 кг сухого воздуха.

**Решение.** Для адиабатного процесса 1-2 степень сжатия

$$\varepsilon = \frac{v_1}{v_2} = \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{1}{k}} = \left( \frac{9}{1} \right)^{\frac{1}{1,4}} = 4,8.$$

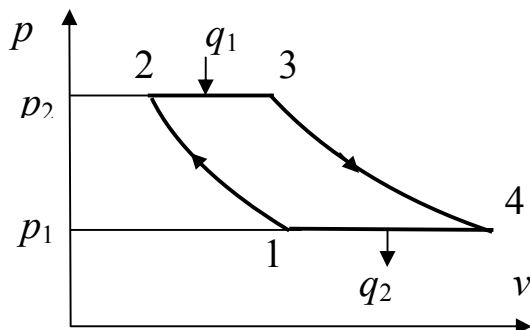


Рис. 2.18. Цикл газотурбинной установки с изобарным подводом теплоты

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}} = 1 - \frac{1}{4,8^{1,4-1}} = 0,466.$$

Для адиабатного процесса 1-2

$$\frac{T_2}{T_1} = \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}};$$

$$T_2 = T_1 \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} = 273 \left( \frac{9}{1} \right)^{\frac{1,4-1}{1,4}} = 511 \text{ К.}$$

Для изобарного процесса 2-3:

$$\frac{v_3}{v_2} = \frac{T_3}{T_2}; \quad T_3 = T_2 \frac{v_3}{v_2} = 511 \cdot 1,5 = 766 \text{ К.}$$

**Задача 16.** Определить термический КПД цикла газовой турбины (рис. 2.19) с подводом теплоты по изохоре и температуру  $T_3$ , если даны  $p_1 = 1$  бар,  $T_1 = 273$  К,  $p_2 = 9$  бар,  $p_3 = 13$  бар, а рабочее вещество – 1 кг сухого воздуха.

**Решение.** Для адиабатного процесса 1-2 степень сжатия

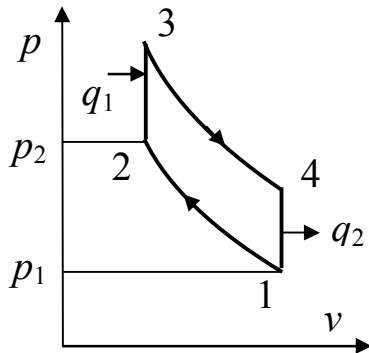


Рис. 2.19. Цикл газотурбинной установки с изохорным подводом теплоты

$$\varepsilon = \frac{v_1}{v_2} = \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{1}{k}} = \left( \frac{9}{1} \right)^{\frac{1}{1,4}} = 4,8.$$

Степень повышения давления

$$\pi = \frac{p_3}{p_2} = \frac{13}{9} = 1,44.$$

$$\eta_t = 1 - \frac{k}{\varepsilon^{k-1}} \frac{\pi^{\frac{1}{k}} - 1}{\pi - 1} =$$

$$= 1 - \frac{1,4}{4,8^{1,4-1}} \frac{1,44^{\frac{1}{1,4}} - 1}{1,44 - 1} = 0,50.$$

Для адиабатного процесса 1-2

$$\frac{T_2}{T_1} = \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}}, \quad T_2 = T_1 \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} = 273 \left( \frac{9}{1} \right)^{\frac{1,4-1}{1,4}} = 511 \text{ К.}$$

Для изохорного процесса 2-3

$$\frac{p_3}{p_2} = \frac{T_3}{T_2}, \quad T_3 = T_2 \frac{p_3}{p_2} = 511 \cdot \frac{13}{9} = 738 \text{ К.}$$

**Задача 17.** Определить температуру газа за турбиной, работающей с начальными параметрами:  $p_{HT} = 0,8$  МПа;  $t_{HT} = 750$  °С. Давление на выхлопе турбины  $p_{BT} = 0,125$  МПа. Внутренний относительный КПД турбины  $\eta_{Oi} = 0,85$ . Рабочее вещество – воздух ( $\kappa = 1,4$ ).

**Решение.** Степень понижения давления в турбине

$$\pi_T = p_{HT} / p_{BT} = 0,8 / 0,125 = 6,4.$$

В случае адиабатного расширения газа в турбине конечная температура на выхлопе

$$(T_{BT})_a = T_{HT} / \pi_T^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} = (273 + 750) / 6,4^{\frac{1,4-1}{1,4}} = 602 \text{ К.}$$

С учетом адиабатного КПД

$$T_{BT} = T_{HT} - (T_{HT} - (T_{BT})_a) \eta_{Oi} = 1023 - (1023 - 602) \cdot 0,85 = 665,15 \text{ К.}$$

## Бланк задания к курсовой работе

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования «Сибирская автомобильно-дорожная  
академия (СибАДИ)»

Кафедра городского строительства и хозяйства

### Задание

к курсовой работе по дисциплине «Генераторы теплоты и автономные системы  
теплоснабжения»

Студент \_\_\_\_\_

1. Тема работы «Расчет принципиальной схемы тепловой электрической  
станции».

2. Срок сдачи студентом законченной работы \_\_\_\_\_.

3. Исходные данные к работе:

Рассчитать принципиальную схему станции с турбиной при следующих ис-  
ходных данных:

начальные параметры пара перед турбиной  $p_0 = 11$  МПа,  $t_0 = 520$  °С;

давление за турбиной  $p_K = 0,9$  МПа;

отпуск пара внешнему потребителю из противодавления  $D_{ВП} = 500$  т/ч;

внутренний относительный КПД турбины  $\eta_{oi} = 0,844$ ;

электромеханический КПД турбогенератора  $\eta_{ЭМ} = 0,97$ ;

число отборов пара на регенерацию  $n = 3$ ;

доля возвращаемого конденсата  $\phi_{БК} = 0,80$ ;  $t_{БК} = 60$  °С;

давление в деаэраторе  $p_D = 0,588$  МПа;

температура химически очищенной воды  $t_{ХОВ} = 25$  °С;

продувка котла  $a_{ПРОД} = 6\% D_T$ ;

потеря пара и конденсата внутри станции  $a_{VT} = 0,6\% D_T$  (условно принято из  
деаэратора);

продувочная вода котла после подогревателя химически очищенной воды  
сливается в канализацию с температурой  $t_{СВ} = 50$  °С.

Принципиальная схема турбоустановки представлена на рис. 2.5.

4. Дата выдачи задания \_\_\_\_\_ 201 г.

**Руководитель:** \_\_\_\_\_  
(подпись)

Задание принял к исполнению \_\_\_\_\_ 201 г.  
(подпись студента)

### Варианты задание к курсовой работе

Параметры	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$p_0$ , МПа	11	11,5	12	12,5	13	11	11,5	12	12,5	13
$t_0$ , °С	520	540	560	520	540	560	520	540	560	580
$p_K$ , МПа	0,9	1,0	1,1	0,9	1,0	1,1	0,9	1,0	1,1	0,9
$D_{ВП}$ , Т/ч	500	520	540	560	550	500	520	540	560	550
$\varphi_{BK}$ , %	0,80	0,82	0,84	0,86	0,80	0,82	0,84	0,86	0,80	0,82
$t_{BK}$ , °С	60	60	60	60	65	65	65	65	70	70
$t_{ХОВ}$ , °С	25	30	35	25	30	35	25	30	35	25
$a_{ПРОД}$ , %, от $D_T$	6	7	8	9	10	6	7	8	9	10
$a_{УТ}$ , %, от $D_T$	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
$t_{СВ}$ , °С	50	55	60	50	55	60	50	55	60	55

Параметры	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$p_0$ , МПа	10	10,5	11	11,5	12	10	10,5	12,5	12,7	13,5
$t_0$ , °С	540	520	550	530	550	530	520	540	560	580
$p_K$ , МПа	1,0	0,9	1,15	0,95	1,05	1,15	0,9	1,0	1,1	0,9
$D_{ВП}$ , Т/ч	500	520	530	550	530	510	520	540	560	550
$\varphi_{BK}$ , %	0,80	0,82	0,83	0,85	0,80	0,82	0,84	0,86	0,80	0,82
$t_{BK}$ , °С	60	60	60	60	65	65	65	65	70	70
$t_{ХОВ}$ , °С	25	30	35	25	32	34	25	30	35	25
$a_{ПРОД}$ , %, от $D_T$	6	7	8	9	10	6	7	8	9	10
$a_{УТ}$ , %, от $D_T$	0,8	0,6	0,8	0,9	1,0	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
$t_{СВ}$ , °С	50	55	60	50	55	60	50	55	60	55

### Контрольные задачи

1. В воздухоподогреватель котельной установки поступает  $5 \text{ м}^3/\text{с}$  воздуха при температуре  $t_1 = 25 \text{ }^\circ\text{C}$  и избыточном давлении 500 мм вод. ст. Определить скорость воздуха после воздухоподогревателя, если площадь поперечного сечения воздухопровода  $F = 4 \text{ м}^2$ . Температура подогретого воздуха  $t_2 = 200 \text{ }^\circ\text{C}$ . Барометрическое давление  $B = 750 \text{ мм рт. ст.}$  (задачу решить в единицах СИ).

2. В резервуаре находится 100 кг влажного пара при степени сухости  $x = 0,8$  и температуре  $t = 250 \text{ }^\circ\text{C}$ . Определить объем резервуара.

3. В сосуде объемом  $V = 1$  л находится в равновесии смесь сухого насыщенного пара и кипящей воды. Найти степень сухости смеси, если ее масса  $m = 0,1$  кг, а температура  $t = 300$  °С.

4. В барабане котельного агрегата находится кипящая вода и над ней насыщенный пар. Определить массу пара, если объем барабана  $V = 8$  м<sup>3</sup>, абсолютное давление  $p = 1,5$  МПа и масса воды  $m_B = 6000$  кг. Принять пар, находящийся над водой, сухим насыщенным.

5. Барабан парового котла объемом  $V = 15$  м<sup>3</sup> заполнили на 50 % сухим насыщенным паром и на 50 % кипящей водой. Определить энтальпию образовавшегося в барабане влажного пара, если давление его  $p = 10$  МПа.

6. Водяной пар, имея абсолютное давление  $p = 5$  МПа и степень сухости  $x = 0,88$ , течет по трубе со скоростью 20 м/с. Определить диаметр трубы, если расход пара  $D = 1,5$  кг/с.

7. Для получения 4,5 кг/с воды с температурой 90 °С имеется влажный пар при абсолютном давлении  $p = 0,15$  МПа и степени сухости 0,9 и вода с температурой 12 °С. Определить секундный расход пара и воды.

8. Водяной пар при абсолютном давлении  $p = 1,5$  МПа имеет энтальпию  $h = 2450$  Дж/кг. Определить параметры пара и его состояние.

9. Водяной пар при температуре  $t = 300$  °С имеет энтропию 7 кДж/(кг·К). Определить параметры пара и его состояние.

10. В барабане парового котла находится влажный пар при абсолютном давлении  $p = 20$  МПа и степени сухости  $x = 0,4$ . Определить массу влажного пара, а также объемы воды и сухого насыщенного пара, если объем парового котла  $V = 12$  м<sup>3</sup>.

11. Определить объем 120 кг влажного пара при абсолютном давлении  $p = 10$  МПа и степени сухости  $x = 0,8$ . Насколько увеличится объем пара, если довести его степень сухости до единицы при том же давлении?

12. Один кг водяного пара, имея начальные параметры  $p_1 = 1,4$  МПа (абсолютных) и  $v_1 = 0,12$  м<sup>3</sup>/кг, нагревается при постоянном давлении до температуры  $t_2 = 270$  °С. Определить конечный объем пара, изменение внутренней энергии, подведенную теплоту и совершенную паром работу. Изобразить процесс в  $T-s$ - и  $h-s$ -диаграммах.

13. Один кг сухого насыщенного водяного пара находится в закрытом сосуде при абсолютном давлении  $p_1 = 0,8$  МПа. Пар охлаждается до температуры  $t_2 = 150$  °С. Определить конечное давление, сте-

пень сухости и количество отведенной теплоты. Изобразить процесс в  $T-s$ - и  $h-s$ -диаграммах.

14. Четыре кг влажного водяного пара, находящегося в закрытом сосуде при абсолютном давлении  $p_1 = 0,1$  МПа и степени сухости  $x_1 = 0,83$ , нагревается до температуры, соответствующей увеличению давления на 20 %. Определить конечную температуру, степень сухости, количество подведенной теплоты. Изобразить процесс в  $T-s$ - и  $h-s$ -диаграммах.

15. В паровом котле находится 8000 кг пароводяной смеси, степень сухости которой  $x_1 = 0,002$ , абсолютное давление  $p_1 = 0,5$  МПа. Определить время, необходимое для достижения давления смеси  $p_2 = 1$  МПа при закрытых вентилях, если смеси сообщается 20 МДж/мин теплоты. Изобразить процесс в  $T-s$ - и  $h-s$ -диаграммах.

16. Начальное состояние водяного пара характеризуется абсолютным давлением  $p_1 = 0,4$  МПа и температурой  $t_1 = 250$  °С. В результате впрыскивания кипящей воды того же давления пар становится насыщенным, давление смеси при этом остается постоянным. Определить количество впрыскиваемой воды на 1 кг пара и работу, совершенную в этом процессе. Изобразить процесс в  $T-s$ - и  $h-s$ -диаграммах.

17. Четыре кг водяного пара, имеющие начальное абсолютное давление  $p_1 = 0,9$  МПа, расширяется при постоянной температуре от объема  $V_1 = 0,2$  м<sup>3</sup> до объема  $V_2 = 0,4$  м<sup>3</sup>. Определить работу расширения и количество подведенной теплоты. Изобразить процесс в  $T-s$ - и  $h-s$ -диаграммах.

18. Один кг пар, имея абсолютное давление  $p_1 = 0,2$  МПа, температуру  $t_1 = 200$  °С, сжимается при постоянной температуре до объема  $V_2 = 0,12$  м<sup>3</sup>/кг. Определить конечные параметры пара и количество отведенной теплоты. Изобразить процесс в  $T-s$ - и  $h-s$ -диаграммах.

19. Сухой насыщенный водяной пар расширяется без теплообмена с окружающей средой от температуры  $t_1 = 180$  °С до  $t_2 = 50$  °С. Определить состояние и параметры пара в конце расширения, а также изменение энтальпии и работу расширения, отнесенные к 1 кг пара. Изобразить процесс в  $T-s$ - и  $h-s$ -диаграммах.

20. Один кг водяного пара расширяется адиабатно. При этом абсолютное давление его меняется от  $p_1 = 9$  МПа до  $p_2 = 4$  МПа. Определить параметры пара, работу расширения и изменение внутренней энергии, если начальная температура пара  $t_1 = 400$  °С. Изобразить процесс в  $T-s$ - и  $h-s$ -диаграммах.

21. Два кг водяного пара, имея начальные параметры  $t_1 = 100$  °С и  $x = 0,95$ , сжимаются без теплообмена с окружающей средой, при этом объем пара уменьшается в 8 раз. Определить параметры и состояние пара в конце расширения, а также изменение энтальпии и работу сжатия. Изобразить процесс в  $T-s$ - и  $h-s$ -диаграммах.

22. Определить скорость истечения водяного пара через суживающееся сопло, если начальные параметры пара  $p_1 = 0,6$  МПа и  $t_1 = 350$  °С, а давление среды, в которую происходит истечение  $p_2 = 0,1$  МПа. Потерями, теплообменом со стенками и скоростью пара на входе в сопло пренебречь.

23. Определить диаметры минимального и выходного сечений сопла Ловаля обдувочного аппарата парового котла с расходом сухого насыщенного пара  $M = 0,3$  кг/с, если начальное давление пара  $p_1 = 2$  МПа, а конечное  $p_2 = 0,1$  МПа. Скоростью пара на входе в сопло, потерями и теплообменом со стенками пренебречь.

24. Перегретый пар с начальными параметрами  $p_1 = 1,6$  МПа и  $t_1 = 300$  °С вытекает через суживающееся сопло в атмосферу ( $p_2 = 0,1$  МПа). Определить скорость истечения, если скоростной коэффициент сопла  $\varphi = 0,90$ . Скоростью на входе в сопло пренебречь.

25. Влажный пар с начальными параметрами  $p_1 = 1,6$  МПа и  $x_1 = 0,98$  вытекает через суживающееся сопло с площадью выходного сечения  $f = 40$  мм<sup>2</sup> в атмосферу ( $p_2 = 0,1$  МПа). Определить секундный расход пара, если скоростной коэффициент сопла  $\varphi = 0,2$ . Скоростью пара на входе в сопло пренебречь.

26. Влажный пар с параметрами  $p_1 = 1$  МПа и  $x_1 = 0,9$  дросселируется в редукционном клапане до  $p_2 = 0,12$  МПа. Пренебрегая изменением скорости пара в трубопроводе, определить состояние и параметры пара после дросселирования, а также изменение внутренней энергии и энтропии пара в этом процессе.

27. Перегретый пар с параметрами  $p_1 = 2$  МПа и  $t_1 = 350$  °С дросселируется в регулирующем клапане паровой турбины до  $p_2 = 1,5$  МПа, а затем адиабатно расширяется в ней до  $p_2 = 0,004$  МПа. Определить потерю располагаемой работы вследствие дросселирования.

28. В клапанах турбины перегретый пар с параметрами  $p_1 = 6$  МПа и  $t_1 = 400$  °С дросселируется до  $p_2 = 5$  МПа, а затем расширяется в турбине до  $p_2 = 0,004$  МПа. Определить потерю теоретической мощности турбины вследствие дросселирования, если расход пара  $D = 10$  кг/с.

29. Определить до какого давления нужно дросселировать влажный пар с параметрами  $p_1 = 1$  МПа и  $x_1 = 0,95$ , чтобы он стал сухим насыщенным. Определить также изменение внутренней энергии и энтропии пара в этом процессе. Изменением скорости пара при дросселировании пренебречь.

30. Перегретый пар с параметрами  $p_1 = 5$  МПа и  $t_1 = 350$  °С дросселируется до  $p_2 = 2$  МПа. Определить состояние и параметры пара после дросселирования, а также изменение внутренней энергии и энтропии пара в этом процессе. Скоростью пара и изменением ее при дросселировании пренебречь.

31. Параметры влажного пара в магистральном паропроводе  $p_1 = 1,4$  МПа и  $x_1 = 0,98$ . Часть пара перепускается через дроссельный вентиль в паропровод низкого давления, в котором  $p_2 = 0,12$  МПа. Пренебрегая изменением скорости при дросселировании, определить состояние и параметры пара в паропроводе низкого давления, а также изменение внутренней энергии и энтропии пара при дросселировании.

32. Электрическая мощность турбогенератора паросиловой установки  $N_{\text{э}} = 25000$  кВт. Определить расход пара на турбину, если параметры пара перед ней  $p_1 = 3,5$  МПа и  $t_1 = 400$  °С, давление в конденсаторе  $p_2 = 0,004$  МПа, относительный эффективный КПД турбины  $\eta_{\text{оэ}} = 0,8$  и КПД генератора  $\eta = 0,95$ , считать, что установка работает по циклу Ренкина, работой насоса пренебречь.

33. Паросиловая установка работает по регенеративному циклу с отборами при давлении 1 и 0,16 МПа, параметры пара перед турбиной  $p_1 = 9$  МПа и  $t_1 = 500$  °С, а давление в конденсаторе  $p_2 = 0,004$  МПа. Определить термический КПД регенеративного цикла и сравнить его с термическим КПД цикла Ренкина, осуществляемого при тех же начальных параметрах и том же конечном давлении пара.

34. Определить термический КПД и конечную влажность пара для идеального цикла паросиловой установки с промежуточным перегревом пара, если в турбину поступает пар с параметрами  $p_1 = 12$  МПа и  $t_1 = 550$  °С, вторичный перегрев осуществляется при давлении  $p = 2,4$  МПа до температуры  $t_1 = 550$  °С, давление в конденсаторе  $p_2 = 0,004$  МПа. Определить также, какое изменение термического КПД и конечной влажности пара дает вторичный перегрев по сравнению с циклом Ренкина для тех же начальных параметров и конечного давления пара.

35. Давление пара перед турбиной  $p_1 = 3$  МПа, а в конденсаторе  $p_2 = 0,004$  МПа. Относительный внутренний КПД турбины  $\eta_{oi} = 0,82$ . Определить какова должна быть температура перед турбиной, чтобы влажность пара при выходе из турбины была равна 12 %. Задачу решить графическим методом.

36. Сравнить термический КПД циклов Ренкина, осуществленных при одинаковых начальных и конечных давлениях  $p_1 = 2$  МПа, и  $p_2 = 0,02$  МПа, если в одном случае пар влажный со степенью сухости  $x_1 = 0,9$ , а в другом – пар сухой насыщенный, а в третьем перегретый – с температурой  $t_1 = 300$  °С.

37. Сравнить теоретические расходы пара для случаев комбинированной и раздельной выработки электроэнергии и теплоты. В обоих случаях параметры пара перед турбиной  $p_1 = 4$  МПа и  $t_1 = 450$  °С, а давление в конденсаторе  $p_2 = 0,004$  МПа, электрическая мощность установки  $N = 50$  МВт, тепловая мощность установки  $Q = 36$  МВт. В первом случае пар к тепловому потребителю направляется из отбора турбины при давлении 0,3 МПа, во втором случае из парогенератора через редуцирующий клапан. Температура возвращаемого конденсата в обоих случаях соответствует насыщению при давлении 0,3 МПа.

38. Параметры пара перед теплофикационной турбиной  $p_1 = 5$  МПа и  $t_1 = 400$  °С. При давлении  $p = 0,3$  МПа часть пара отбирается на производство, откуда возвращается конденсат с температурой  $t = 60$  °С. Определить теоретическую мощность турбины, если расход пара на нее составляет 30 кг/с, а отпуск теплоты на производство – 35 МДж/с.

39. Параметры пара перед теплофикационной турбиной  $p_1 = 8$  МПа и  $t_1 = 450$  °С. При давлении  $p = 0,6$  МПа часть пара отбирается на производство, откуда возвращается конденсат с температурой  $t = 50$  °С. Остальной пар расширяется в турбине до давления  $p_1 = 0,12$  МПа и направляется в теплофикационную сеть, откуда возвращается конденсат с температурой  $t = 30$  °С. Определить теоретическую мощность турбины, если расход теплоты на производство составляет 14 МВт, а на отопление – 37 МВт.

40. Определить термический КПД цикла паросиловой установки с регенеративным отбором при давлении 0,3 МПа, если в турбину поступает пар с параметрами  $p_1 = 6$  МПа и  $t_1 = 450$  °С, давление в конденсаторе  $p_2 = 0,004$  МПа. Определить также относительное количество пара, расходуемое на регенерацию и термический КПД цикла Ренкина при тех же начальных параметрах и конечном давлении пара.

41. Сравнить термический КПД цикла Ренкина, регенеративного цикла с отбором при давлении пара 2,6 МПа и регенеративного цикла с двумя отборами при давлении пара 2,6 и 0,12 МПа. Для всех трех случаев начальные параметры пара  $p_1 = 18$  МПа и  $t_1 = 550$  °С, давление в конденсаторе  $p_2 = 0,004$  МПа.

### Список рекомендуемой литературы

1. *Баженов М.И.* Сборник задач по курсу «Промышленные тепловые электростанции»: учеб. пособие для вузов / М.И. Баженов, А.С. Богородский. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 128 с.
2. *Галдин В.Д.* Основы теории и расчет теплохладоэнергетических агрегатов: учеб. пособие / В.Д. Галдин, В.И. Гриценко. – Омск: Изд-во СибАДИ, 2008. – 166 с.
3. *Галдин В.Д.* Паровые и водогрейные котлы: учеб. пособие / В.Д. Галдин. – Омск: СибАДИ, 2011. – 48 с.
4. Иллюстрационный материал по дисциплине «Теплогенерирующие установки» / сост. В.Д. Галдин. – Омск: СибАДИ, 2010. – 98 с.
5. Расчет тепловых схем теплогенерирующих установок: метод. указания к курсовой работе / сост.: В.Д. Галдин, А.Н. Хуторной. – Омск: СибАДИ, 2010. – 40 с.
6. *Делягин Г. Н.* Теплогенерирующие установки / Г. Н. Делягин, В.И. Лебедев, Б. А. Пермяков. – М.: Стройиздат, 1986. – 559 с.
7. *Ривкин С.Л.* Термодинамические свойства воды и водяного пара: справ. / С.Л. Ривкин, А.А. Александров. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 80 с.
8. *Соколов Б.А.* Котельные установки и их эксплуатация / Б.А. Соколов. – М.: Издательский центр «Академия», 2008. – 432 с.
9. *Сидельковский Л.Н.* Котельные установки промышленных предприятий / Л.Н. Сидельковский, В.Н. Юренев. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 528 с.
10. *Тихомиров К.В.* Теплотехника, теплогазоснабжение и вентиляция / К.В. Тихомиров, Э.С. Сергеенко. – М.: ООО «БАСТЕТ», 2007. – 480 с.

Таблица П.1

## Термодинамические свойства воды и водяного пара в состоянии насыщения (по температуре)

$t$ , °C	$p$ , МПа	$v'$	$v''$	$h'$	$h''$	$r$	$s'$	$s''$
		м <sup>3</sup> /кг		кДж/кг			кДж/(кг·К)	
0,01	0,0006108	0,0010002	206,3	0,000614	2501,0	2501,0	0,0000	9,1562
5	0,0008719	0,0010001	147,2	21,01	2510,2	2489,2	0,0762	9,0258
10	0,0012277	0,0010004	106,42	41,99	2519,4	2477,4	0,1510	8,9009
15	0,0017041	0,0010010	77,97	62,94	2528,6	2465,7	0,2243	8,7815
20	0,0023370	0,0010018	57,84	83,86	2536,8	2453,8	0,2963	8,6674
25	0,0031660	0,0010030	43,40	104,77	2546,8	2442,0	0,3670	8,5583
30	0,0042410	0,0010044	32,93	125,66	2555,9	2430,2	0,4365	8,4538
35	0,0056220	0,0010061	25,24	146,56	2565,0	2419,6	0,5049	8,3536
40	0,0073750	0,0010079	19,55	167,45	2574,0	2406,5	0,5721	8,2576
45	0,0095840	0,0010099	15,28	188,35	2582,9	2394,5	0,6383	8,1655
50	0,012335	0,0010121	12,04	209,26	2593,6	2382,5	0,7035	8,0598
55	0,015740	0,0010145	9,578	230,17	2600,7	2370,5	0,7677	7,9922
60	0,019917	0,0010171	7,678	251,09	2609,5	2358,4	0,8310	7,9106
65	0,02501	0,0010199	6,201	272,02	2618,2	2346,2	0,8933	7,8320
70	0,03117	0,0010228	5,045	292,97	2626,08	2333,8	0,9548	7,7565
75	0,03855	0,0010258	4,133	313,94	2635,3	2321,4	1,0154	7,6837
80	0,04736	0,0010290	3,408	334,92	2643,8	2308,9	1,0752	7,6135
85	0,05781	0,0010324	2,828	355,92	2652,1	2296,2	1,1343	7,5459
90	0,07011	0,0010359	2,361	376,94	2660,3	2283,4	1,1925	7,4805
95	0,084551	0,0010396	1,982	397,99	2668,4	2270,4	1,2500	7,4174
100	0,10132	0,0010435	1,673	419,06	2676,3	2257,2	1,3069	7,3564
105	0,12079	0,0010474	1,419	440,17	2684,1	2243,9	1,3630	7,2974
110	0,14326	0,0010515	1,210	461,32	2691,8	2230,5	1,4185	7,2402
120	0,19854	0,0010603	0,8917	503,7	2706,6	2202,9	1,5276	7,1310
130	0,27011	0,0010697	0,6683	546,3	2720,7	2174,4	1,6344	7,0281
140	0,3614	0,0010798	0,5087	589,1	2734,0	2144,9	1,7390	6,9307

Окончание таб. П.1

$t$ , °C	$p$ , МПа	$v'$ ,	$v''$ ,	$h'$ ,	$h''$ ,	$r$ ,	$s'$ ,	$s''$ ,
		м <sup>3</sup> /кг		кДж/кг			кДж/(кг·К)	
150	0,4760	0,0010906	0,3926	632,2	2746,3	2114,1	1,8416	6,8381
160	0,6180	0,0011021	0,3068	675,5	2757,7	2082,5	1,9425	6,7498
170	0,7920	0,0011144	0,2426	719,1	2768,0	2048,9	2,0416	6,6652
180	1,0027	0,0011275	0,1939	763,1	2777,1	2014,0	2,1393	6,5838
190	1,2553	0,0011415	0,1564	807,5	2784,9	1977,4	2,2356	6,5052
200	1,5551	0,0011565	0,1272	852,4	2791,4	1939,0	2,3307	6,4289
210	1,9080	0,0011726	0,1043	897,8	2796,4	1898,6	2,4247	6,3546
220	2,3201	0,0011900	0,08606	943,7	2799,9	1856,2	2,5178	6,2819
230	2,7979	0,0012087	0,07147	990,3	2801,7	1811,4	2,6102	6,2104
240	3,3480	0,0012291	0,05967	1037,6	2801,6	1764,0	2,7021	6,1397
250	3,9776	0,0012512	0,05006	1085,8	2799,5	1713,7	2,7936	6,0693
260	4,694	0,0012755	0,04215	1135,0	2796,2	1660,2	2,8850	5,9989
270	5,505	0,0013023	0,03560	1185,4	2788,3	1602,9	2,9766	5,9278
280	6,491	0,0013321	0,03013	1237,0	2778,6	1541,6	3,0687	5,8555
290	7,445	0,0013655	0,02554	1290,3	2765,4	1475,1	3,1616	5,7811
300	8,592	0,0014036	0,02164	1345,4	2748,4	1403,0	3,2559	5,7038
310	9,870	0,001447	0,01832	1402,9	2726,8	1323,9	3,3522	5,6224
320	11,290	0,001499	0,01545	1469,2	2699,6	1236,2	3,4513	5,5356
330	12,865	0,001562	0,01297	1527,5	2665,5	1138,0	3,5546	5,4414
340	14,608	0,001639	0,01078	1596,8	2622,3	1025,5	3,6638	5,3363
350	16,537	0,001741	0,008803	1672,9	2566,1	893,2	3,7816	5,1249
360	18,674	0,001894	0,006943	1763,1	2485,7	722,6	3,9189	5,0603
370	21,053	0,00222	0,00493	1896,2	2335,7	439,5	4,1198	4,8031
374	22,087	0,00280	0,00347	2039,2	2150,7	111,5	4,3374	4,5096

Примечание. Параметры критического состояния:  $t_{кр} = 374,12$  °C,  $p_{кр} = 22,115$  МПа,  $v_{кр} = 0,003147$  м<sup>3</sup>/кг,  $h_{кр} = 2095,2$  кДж/кг,  $s_{кр} = 4,4237$  кДж/(кг·К)

Таблица П.2

## Термодинамические свойства воды и водяного пара в состоянии насыщения (по давлениям)

$p$ , МПа	$t$ , °С	$v'$ ,	$v''$ ,	$h'$ ,	$h''$ ,	$r$ ,	$s'$ ,	$s''$ ,
		м <sup>3</sup> /кг		кДж/кг		кДж/(кг·К)		
0,001	6,982	0,0010001	129,208	29,33	2513,8	2484,5	0,1060	8,9756
0,002	17,511	0,0010012	67,006	73,45	2533,2	2459,8	0,2606	8,7236
0,003	24,098	0,0010027	45,668	101,00	2545,2	2444,2	0,3543	8,5776
0,004	28,981	0,0010040	34,803	121,41	2554,1	2432,7	0,4224	8,4747
0,005	32,90	0,0010052	28,196	137,77	2561,2	2423,4	0,4762	8,3952
0,006	36,18	0,0010064	23,742	151,50	2567,1	2415,6	0,5209	8,3305
0,007	39,02	0,0010074	20,532	163,38	2572,2	2408,8	0,5591	8,2760
0,008	41,53	0,0010084	18,106	173,87	2576,7	2402,8	0,5926	8,2289
0,009	43,79	0,0010094	16,206	183,28	2580,8	2397,5	0,6224	8,1875
0,010	45,83	0,0010102	14,676	191,84	2584,4	2392,6	0,6493	8,1505
0,020	60,09	0,0010172	7,6515	251,46	2609,6	2355,6	0,8321	7,9092
0,030	69,12	0,0010223	5,2308	289,31	2625,3	2336,0	0,9441	7,7695
0,040	75,89	0,0010265	3,9949	317,65	2636,8	2319,2	1,0261	7,6711
0,050	81,35	0,0010301	3,2415	340,57	2646,0	2305,4	1,0912	7,5951
0,060	85,95	0,0010333	2,7329	359,93	2653,6	2293,7	1,1454	7,5332
0,070	89,96	0,0010361	2,3658	376,77	2660,2	2283,4	1,1921	7,4811
0,080	93,51	0,0010387	2,0879	398,63	2666,0	2274,3	1,2330	7,4360
0,090	96,71	0,0010412	1,8702	405,21	2671,1	2265,9	1,2696	7,3963
0,100	99,63	0,0010434	1,6946	417,51	2675,7	2258,5	1,3027	7,3608
0,200	120,23	0,0010608	0,88592	504,7	2706,9	2202,2	1,5301	7,1286
0,300	133,54	0,0010735	0,60586	561,4	2725,5	2164,1	1,6717	6,9930
0,400	143,62	0,0010839	0,46242	604,7	2738,5	2133,8	1,7764	6,8966
0,500	151,82	0,0010928	0,37481	640,1	2748,5	2108,4	1,8604	6,8215
0,600	158,84	0,0011009	0,31556	670,4	2756,4	2086,0	1,9308	6,7598
0,700	164,96	0,0011082	0,27274	692,0	2762,9	2065,8	1,9918	6,7074
0,800	170,42	0,0011150	0,24030	720,9	2768,4	2047,5	2,0457	6,6618

Окончание табл. П.2

$p$ , МПа	$t$ , °C	$\nu'$ ,	$\nu''$ ,	$h'$ ,	$h''$ ,	$r$ ,	$s'$ ,	$s''$ ,
		м <sup>3</sup> /кг		кДж/кг			кДж/(кг·К)	
0,900	175,36	0,0011213	0,21484	742,6	2773,0	2030,4	2,0941	6,6212
1,000	179,88	0,0011274	0,19430	762,6	2777,0	2014,4	2,1382	6,5847
1,500	198,28	0,0011538	0,13165	844,7	2790,4	1945,7	2,3144	6,4418
2,000	212,37	0,0011766	0,09953	908,6	2797,4	1888,8	2,4468	6,3373
2,500	223,94	0,0011972	0,07990	962,0	2800,8	1838,8	2,5543	6,2536
3,000	233,84	0,0012163	0,06662	10008,4	2801,9	1793,5	2,6455	6,1832
3,500	242,54	0,0012345	0,05702	1049,8	2801,3	1751,5	2,7253	6,1218
4,000	250,33	0,0012521	0,04974	1087,5	2799,4	1711,9	2,7967	6,0670
4,500	257,41	0,0012691	0,04402	1122,2	2796,5	1674,3	2,8614	6,0171
5,000	263,92	0,0012858	0,03941	1154,6	2792,8	1638,2	2,9209	5,9712
5,600	279,09	0,0013056	0,03492	1191,0	2787,4	1563,7	2,9867	5,9199
6,000	275,56	0,0013187	0,03241	1213,9	2783,3	1569,4	3,0277	5,8878
6,600	281,85	0,0013383	0,02920	1246,8	2776,4	1529,6	3,0858	5,8419
7,000	285,80	0,0013514	0,02734	1267,7	2770,1	1503,7	3,1225	5,8126
7,600	291,42	0,0013711	0,02492	1298,0	2763,3	1465,3	3,1749	5,7703
8,000	294,98	0,0013843	0,02349	1317,5	2757,5	1440,0	3,2083	5,7430
8,600	300,07	0,0014043	0,02159	1345,8	2748,3	1402,5	3,2565	5,7032
9,000	303,31	0,0014179	0,02046	1364,2	2741,8	1377,6	3,2875	5,6773
9,600	307,98	0,0014385	0,01893	1391,1	2731,6	1340,5	3,3325	5,6393
10,00	310,96	0,0014526	0,01800	1408,6	2724,4	1315,8	3,3616	5,6143
11,00	318,04	0,0014887	0,01597	1451,2	2705,4	1254,2	3,4316	5,5531
12,00	324,64	0,0015267	0,01425	1492,6	2684,8	1192,2	3,4986	5,4930
13,00	330,81	0,0015670	0,01277	1541,0	2662,4	1129,4	3,5633	5,4333
15,00	342,12	0,0016580	0,01035	1612,2	2611,6	999,4	3,6877	5,3122
17,00	352,56	0,0017690	0,00840	1691,6	2550,8	859,2	3,8103	5,1841
19,00	361,44	0,0019231	0,00670	1778,2	2470,1	691,9	3,9417	5,0321
21,00	369,79	0,002218	0,00222	1892,2	2340,2	448,0	4,1137	4,8106

Таблица П.3

## Термодинамические параметры недогретой воды и перегретого пара

Температура $t, ^\circ\text{C}$	$p = 0,001 \text{ МПа}$			$p = 0,002 \text{ МПа}$		
	$t_s = 6,982 ^\circ\text{C}$ , $v' = 0,0010001 \text{ м}^3/\text{кг}$ ; $v'' = 129,208 \text{ м}^3/\text{кг}$ ; $h' = 29,33 \text{ кДж/кг}$ ; $h'' = 2513,80 \text{ кДж/кг}$ ; $s' = 0,1060 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ ; $s'' = 8,97560 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$			$t_s = 17,511 ^\circ\text{C}$ , $v' = 0,00100012 \text{ м}^3/\text{кг}$ ; $v'' = 67,006 \text{ м}^3/\text{кг}$ ; $h' = 73,45 \text{ кДж/кг}$ ; $h'' = 2533,2 \text{ кДж/кг}$ ; $s' = 0,2606 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ ; $s'' = 8,7236 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$		
	$v, \text{ м}^3/\text{кг}$	$h, \text{ кДж/кг}$	$s, \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$	$v, \text{ м}^3/\text{кг}$	$h, \text{ кДж/кг}$	$s, \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$
0	<u>0,0010002</u>	<u>0,0</u>	<u>-0,0001</u>	0,0010002	0,0	-0,0010
10	130,60	2519,5	8,9956	<u>0,0010002</u>	<u>42,0</u>	<u>0,1510</u>
20	135,23	2538,1	9,0604	67,58	2537,8	8,7396
30	139,85	2556,8	9,1230	69,90	2556,5	8,8024
40	144,47	2575,5	9,1837	72,21	2575,3	8,8632
50	149,09	2594,2	9,2426	74,53	2594,0	8,9222
60	153,71	2613,0	9,2997	76,84	2612,8	8,9794
70	158,33	2631,8	9,3553	79,15	2631,6	9,0350
80	162,95	2650,6	9,4093	81,46	2650,4	9,0891
90	167,57	2669,4	9,4619	83,77	2669,3	9,1418
100	172,19	2688,3	9,5132	86,08	2688,2	9,1931
120	181,42	2726,2	9,6122	90,70	2726,1	9,2921
140	190,66	2764,3	9,7066	95,32	2764,2	9,3866
160	199,89	2802,6	9,7971	99,94	2802,5	9,4771
180	209,10	2841,0	9,8839	104,55	2841,0	9,5639
200	218,30	2879,7	9,9674	109,17	2879,7	9,6475
250	241,40	2977,4	10,164	120,71	2977,4	9,8437
300	264,50	3076,5	10,3446	132,25	3076,5	10,0247
350	287,60	3177,2	10,5130	143,79	3177,2	10,1931
400	310,70	3279,5	10,6709	155,33	3279,5	10,351
500	356,80	3489,0	10,960	178,4	3488,9	10,641
600	402,96	3705,3	11,224	201,5	3705,3	10,904

Продолжение табл. П.3

Температура $t, ^\circ\text{C}$	$p = 0,003 \text{ МПа}$			$p = 0,004 \text{ МПа}$		
	$t_s = 24,098 ^\circ\text{C},$			$t_s = 23,981 ^\circ\text{C},$		
	$\nu' = 0,00100271 \text{ м}^3/\text{кг}; \nu'' = 45,668 \text{ м}^3/\text{кг};$ $h' = 101,00 \text{ кДж/кг}; h'' = 2545,2 \text{ кДж/кг};$ $s' = 0,3543 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К}); s'' = 8,5776 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$			$\nu' = 0,0010040 \text{ м}^3/\text{кг}; \nu'' = 34,803 \text{ м}^3/\text{кг};$ $h' = 121,41 \text{ кДж/кг}; h'' = 2554,1 \text{ кДж/кг};$ $s' = 0,4224 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К}); s'' = 8,4747 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$		
	$\nu, \text{ м}^3/\text{кг}$	$h, \text{ кДж/кг}$	$s, \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$	$\nu, \text{ м}^3/\text{кг}$	$h, \text{ кДж/кг}$	$s, \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$
0	0,0010002	0,0	-0,0001	0,0010002	0,0	-0,0001
10	0,0010002	42,0	0,1510	0,0010002	42,0	0,1510
20	<u>0,0010017</u>	<u>83,9</u>	<u>0,2963</u>	<u>0,0010017</u>	<u>83,9</u>	<u>0,2963</u>
30	46,58	2556,3	8,6145	34,92	2556,0	8,4810
40	48,13	2575,0	8,6755	36,08	2574,8	8,5421
50	49,67	2593,8	8,7345	37,24	2593,6	8,6012
60	51,21	2612,6	8,7918	38,40	2612,4	8,6586
70	52,76	2631,4	8,8475	39,56	2631,3	8,7143
80	54,30	2650,3	8,9016	40,72	2650,2	8,7685
90	55,84	2669,2	8,9544	41,87	2669,1	8,8213
100	57,38	2688,1	9,0057	43,03	2688,0	8,8727
120	60,46	2726,0	9,1048	45,34	2726,0	8,9718
140	63,54	2764,2	9,1993	47,65	2764,1	9,0664
160	66,62	2802,4	9,2898	49,96	2802,4	9,1570
180	69,70	2840,9	9,3767	52,27	2840,9	9,2438
200	72,78	2879,6	9,4603	54,58	2879,6	9,3274
250	80,47	2977,3	9,6565	60,35	2977,3	9,5237
300	88,16	3076,5	9,8375	66,12	3076,5	9,7047
350	95,86	3177,2	10,0060	71,89	3177,2	9,8732
400	103,55	3279,5	10,164	77,66	3279,5	10,001
450	111,24	3383,3	10,312	83,43	3383,3	10,179
500	118,94	3488,9	10,453	89,20	3488,9	10,321
600	134,32	3705,3	10,717	100,74	3705,3	10,584

Продолжение табл. П.3

Температура $t, ^\circ\text{C}$	$p = 0,005 \text{ МПа}$			$p = 0,006 \text{ МПа}$		
	$t_s = 32,90 ^\circ\text{C},$			$t_s = 36,18 ^\circ\text{C},$		
	$\upsilon' = 0,0010052 \text{ м}^3/\text{кг}; \upsilon'' = 28,196 \text{ м}^3/\text{кг};$ $h' = 137,77 \text{ кДж/кг}; h'' = 2561,2 \text{ кДж/кг};$ $s' = 0,4762 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К}); s'' = 8,3952 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$			$\upsilon' = 0,0010064 \text{ м}^3/\text{кг}; \upsilon'' = 23,742 \text{ м}^3/\text{кг};$ $h' = 151,50 \text{ кДж/кг}; h'' = 2567,1 \text{ кДж/кг};$ $s' = 0,5209 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К}); s'' = 8,3305 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$		
	$\upsilon, \text{ м}^3/\text{кг}$	$h, \text{ кДж/кг}$	$s, \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$	$\upsilon, \text{ м}^3/\text{кг}$	$h, \text{ кДж/кг}$	$s, \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$
0	0,0010002	0,0	-0,0001	0,0010002	0,0	-0,0001
10	0,0010002	42,0	0,1510	0,0010002	42,0	0,1510
20	0,0010017	83,9	0,2963	0,0010017	83,9	0,2963
30	<u>0,0010043</u>	<u>125,7</u>	<u>0,4365</u>	<u>0,0010043</u>	<u>125,7</u>	<u>0,4365</u>
40	28,86	2574,6	8,4385	24,04	2574,3	8,3537
50	29,78	2593,4	8,4977	24,81	2593,2	8,4130
60	30,71	2612,3	8,5552	25,59	2612,1	8,4706
70	31,64	2631,1	8,6110	26,36	2631,0	8,5265
80	32,57	2650,0	8,6652	27,13	2649,9	8,5808
90	33,49	2668,9	8,7180	27,91	2668,8	8,6336
100	34,42	2687,9	8,7695	28,68	2687,8	8,6851
120	36,27	2725,9	8,8687	30,22	2725,8	8,7843
140	38,12	2764,0	8,9633	31,76	2763,9	8,8790
160	39,97	2802,3	9,0539	33,30	2802,3	8,9696
180	41,81	2840,8	9,1408	34,84	2840,8	9,0565
200	43,66	2879,5	9,2244	36,38	2879,5	9,1402
250	48,28	2977,3	9,4207	40,23	2977,2	9,5175
300	52,90	3076,4	9,6017	44,08	3076,4	9,5175
350	57,51	3177,1	9,7702	47,93	3177,1	9,6860
400	62,13	3279,4	9,9280	51,77	3279,4	9,8439
450	66,74	3383,3	10,077	55,62	3383,3	9,9928
500	71,36	3489,0	10,218	59,47	3489,0	10,134
600	80,59	3705,3	10,481	67,16	3705,3	10,397

Продолжение табл. П.3

Температура $t, ^\circ\text{C}$	$p = 0,007 \text{ МПа}$			$p = 0,008 \text{ МПа}$		
	$t_s = 39,02 ^\circ\text{C},$ $\nu' = 0,0010074 \text{ м}^3/\text{кг}; \nu'' = 20,532 \text{ м}^3/\text{кг};$ $h' = 163,38 \text{ кДж/кг}; h'' = 2572,2 \text{ кДж/кг};$ $s' = 0,5591 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}; s'' = 8,2760 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$			$t_s = 41,53 ^\circ\text{C},$ $\nu' = 0,0010074 \text{ м}^3/\text{кг}; \nu'' = 18,106 \text{ м}^3/\text{кг};$ $h' = 173,87 \text{ кДж/кг}; h'' = 2576,7 \text{ кДж/кг};$ $s' = 0,5926 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}; s'' = 8,2289 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$		
	$\nu, \text{ м}^3/\text{кг}$	$h, \text{ кДж/кг}$	$s, \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$	$\nu, \text{ м}^3/\text{кг}$	$h, \text{ кДж/кг}$	$s, \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$
0	0,0010002	0,0	-0,0001	0,0010002	0,0	-0,0001
10	0,0010002	42,0	0,1510	0,0010002	42,0	0,1510
20	0,0010017	83,9	0,2963	0,0010017	83,9	0,2963
30	<u>0,0010043</u>	<u>125,7</u>	<u>0,4365</u>	0,0010043	125,7	0,4365
40	20,60	2574,1	8,2819	<u>0,0010078</u>	<u>164,4</u>	<u>0,5721</u>
50	21,26	2593,0	8,3414	18,60	2592,8	8,2792
60	21,93	2611,9	8,3990	19,18	2611,7	8,3369
70	22,59	2630,8	8,4550	19,76	2630,6	8,3329
80	23,25	2649,7	8,5093	20,34	2649,6	8,4474
90	23,92	2668,7	8,5622	20,92	2668,6	8,5003
100	24,58	2687,6	8,6137	21,50	2687,5	8,5519
120	25,90	2725,7	8,7130	22,66	2725,6	8,6512
140	27,22	2763,8	8,8077	23,82	2763,8	8,7460
160	28,54	2802,2	8,8984	24,97	2802,1	8,8366
180	29,86	2840,7	8,9853	26,13	2840,7	8,9236
200	31,18	2879,5	9,0689	27,28	2879,4	9,0072
250	34,48	2977,2	9,2653	30,17	2977,2	9,2036
300	37,78	3076,4	9,4464	33,06	3076,4	9,3847
350	41,08	3177,1	9,6148	35,94	3177,1	9,5532
400	44,38	3279,4	9,7727	38,83	3279,4	9,7111
450	47,67	3383,3	9,9216	41,71	3383,3	9,8600
500	50,97	3488,9	10,063	44,60	3488,9	10,001
600	57,56	3705,3	10,326	50,37	3705,2	10,264

Продолжение табл. П.3

Температура $t, ^\circ\text{C}$	$p = 0,009 \text{ МПа}$			$p = 0,010 \text{ МПа}$		
	$t_s = 43,79 ^\circ\text{C},$			$t_s = 45,83 ^\circ\text{C},$		
	$\nu' = 0,0010094 \text{ м}^3/\text{кг}; \nu'' = 16,206 \text{ м}^3/\text{кг};$ $h' = 183,28 \text{ кДж/кг}; h'' = 2580,8 \text{ кДж/кг};$ $s' = 0,6224 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}; s'' = 8,1875 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$			$\nu' = 0,0010102 \text{ м}^3/\text{кг}; \nu'' = 14,676 \text{ м}^3/\text{кг};$ $h' = 191,84 \text{ кДж/кг}; h'' = 2584,4 \text{ кДж/кг};$ $s' = 0,6493 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}; s'' = 8,1505 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$		
	$\nu, \text{ м}^3/\text{кг}$	$h, \text{ кДж/кг}$	$s, \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$	$\nu, \text{ м}^3/\text{кг}$	$h, \text{ кДж/кг}$	$s, \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$
0	0,0010002	0,0	-0,0001	0,0010002	0,0	-0,0001
10	0,0010002	42,0	0,1510	0,0010002	42,0	0,1510
20	0,0010017	83,9	0,2963	0,0010017	83,9	0,2963
30	0,0010043	125,7	0,4365	0,0010043	125,7	0,4365
40	<u>0,0010078</u>	<u>167,4</u>	<u>0,5721</u>	<u>0,0010078</u>	<u>167,4</u>	<u>0,5721</u>
50	16,53	2592,6	8,2243	14,87	2592,3	8,1752
60	17,05	2611,5	8,2821	15,34	2611,3	8,2331
70	17,56	2630,5	8,3382	15,80	2630,3	8,2892
80	18,08	2649,4	8,3927	16,27	2649,3	8,3437
90	18,59	2668,4	8,4457	16,73	2668,3	8,3968
100	19,11	2687,4	8,4973	17,20	2687,3	8,4484
120	20,14	2725,5	8,5967	18,12	2725,4	8,5479
140	21,17	2763,7	8,6915	19,05	2763,6	8,6427
160	22,20	2802,1	8,7822	19,98	2802,0	8,7334
180	23,22	2860,0	8,8692	20,90	2840,6	8,8204
200	24,25	2879,4	8,9528	21,82	2879,3	8,9041
250	26,82	2977,1	9,1492	24,14	2977,1	9,1006
300	29,38	3076,3	9,3303	26,44	3076,3	9,2817
350	31,95	3177,1	9,4988	28,75	3177,0	9,4502
400	34,51	3279,4	9,6567	31,06	3279,4	9,6081
450	37,08	3383,3	9,8056	33,37	3383,3	9,7570
500	39,64	3488,9	9,9468	35,68	3488,9	9,8982
600	44,77	3705,2	10,210	40,29	3705,2	10,161

Продолжение табл. П.3

Температура $t, ^\circ\text{C}$	$p = 0,020 \text{ МПа}$			$p = 0,030 \text{ МПа}$		
	$t_s = 60,09 ^\circ\text{C},$			$t_s = 69,12 ^\circ\text{C},$		
	$\nu' = 0,0010172 \text{ м}^3/\text{кг}; \nu'' = 7,6515 \text{ м}^3/\text{кг};$ $h' = 251,46 \text{ кДж/кг}; h'' = 2584,4 \text{ кДж/кг};$ $s' = 0,8321 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}; s'' = 7,9092 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$			$\nu' = 0,0010223 \text{ м}^3/\text{кг}; \nu'' = 5,2308 \text{ м}^3/\text{кг};$ $h' = 289,31 \text{ кДж/кг}; h'' = 2625,3 \text{ кДж/кг};$ $s' = 0,9441 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}; s'' = 7,7695 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$		
	$\nu, \text{ м}^3/\text{кг}$	$h, \text{ кДж/кг}$	$s, \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$	$\nu, \text{ м}^3/\text{кг}$	$h, \text{ кДж/кг}$	$s, \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$
0	0,0010002	0,0	-0,0001	0,0010002	0,0	-0,0001
10	0,0010002	42,0	0,1510	0,0010002	42,0	0,1510
20	0,0010017	83,9	0,2963	0,0010017	83,9	0,2963
30	0,0010043	125,7	0,4365	0,0010043	125,7	0,4365
40	0,0010078	167,5	0,5721	0,0010078	167,5	0,5721
50	0,0010121	209,3	0,7035	0,0010121	209,3	0,7035
60	<u>0,0010171</u>	<u>251,1</u>	<u>0,8310</u>	<u>0,0010171</u>	<u>251,1</u>	<u>0,8310</u>
70	7,884	2628,6	7,9654	5,245	2626,9	7,7744
80	8,119	2647,8	8,0205	5,402	2646,3	7,8301
90	8,352	2667,0	8,0740	5,559	2665,7	7,8841
100	8,586	2686,1	8,1261	5,716	2684,9	7,9365
120	9,052	2724,4	8,2261	6,027	2723,5	8,0371
140	9,516	2762,8	8,3213	6,338	2762,1	8,1328
160	9,980	2801,3	8,4124	6,649	2800,7	8,2241
180	10,444	2840,0	8,4996	6,958	2839,4	8,3116
200	10,907	2878,8	8,5834	7,268	2878,4	8,3956
250	12,064	2976,7	8,7802	8,040	2976,4	8,5926
300	13,219	3076,0	8,9614	8,811	3075,8	8,7740
350	14,374	3176,8	9,1300	9,581	3176,6	8,9426
400	15,529	3279,2	9,2880	10,351	3279,0	9,1007
450	16,68	3383,1	9,4369	11,121	3383,0	9,2497
500	17,84	3488,8	9,5781	11,891	3488,6	9,3909
600	20,15	3705,1	9,8413	13,43	3705,1	9,6541

Продолжение табл. П.3

Температура $t, ^\circ\text{C}$	$p = 0,040 \text{ МПа}$			$p = 0,050 \text{ МПа}$		
	$t_s = 75,89 ^\circ\text{C},$ $\nu' = 0,0010228 \text{ м}^3/\text{кг}; \nu'' = 3,9949 \text{ м}^3/\text{кг};$ $h' = 317,65 \text{ кДж/кг}; h'' = 2636,8 \text{ кДж/кг};$ $s' = 1,0261 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}; s'' = 7,6711 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$			$t_s = 81,35 ^\circ\text{C},$ $\nu' = 0,0010333 \text{ м}^3/\text{кг}; \nu'' = 3,2415 \text{ м}^3/\text{кг};$ $h' = 340,57 \text{ кДж/кг}; h'' = 2646,0 \text{ кДж/кг};$ $s' = 1,0912 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}; s'' = 7,5951 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$		
	$\nu, \text{ м}^3/\text{кг}$	$h, \text{ кДж/кг}$	$s, \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$	$\nu, \text{ м}^3/\text{кг}$	$h, \text{ кДж/кг}$	$s, \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$
0	0,0010002	0,0	-0,0001	0,0010002	0,0	-0,0001
10	0,0010002	42,0	0,1510	0,0010002	42,0	0,1510
20	0,0010017	83,9	0,2963	0,0010017	83,9	0,2963
30	0,0010043	125,7	0,4365	0,0010043	125,7	0,4365
40	0,0010078	167,5	0,5721	0,0010078	167,5	0,5721
50	0,0010121	209,3	0,7035	0,0010121	209,3	0,7035
60	0,0010171	251,1	0,8310	0,0010171	251,1	0,8310
70	<u>0,0010228</u>	<u>293,0</u>	<u>0,9548</u>	0,0010228	293,0	0,9548
80	4,044	2644,9	7,6940	<u>0,0010292</u>	<u>334,9</u>	<u>1,0752</u>
90	4,162	2664,4	7,7485	3,324	2663,0	7,6425
100	4,280	2683,8	7,8013	3,419	2682,6	7,6958
120	4,515	2722,6	7,9025	3,608	2721,7	7,7977
140	4,749	2761,3	7,9986	3,796	2760,5	7,8942
160	4,983	2800,1	8,0903	3,983	2799,5	7,9862
180	5,216	2838,9	8,1780	4,170	2838,4	8,0741
200	5,448	2877,9	8,2621	4,356	2877,5	8,1584
250	6,028	2976,1	8,4594	4,820	2975,8	8,3560
300	6,606	3075,6	8,6409	5,284	3075,3	8,5376
350	7,185	3176,5	8,8097	5,747	3176,3	8,7065
400	7,763	3258,9	8,9678	6,209	3258,7	8,8646
450	8,340	3382,9	9,1168	6,671	3382,8	9,0137
500	8,918	3488,6	9,2581	7,134	3488,5	9,1550
600	10,07	3705,0	9,5212	8,057	3704,9	9,4182

Продолжение табл. П.3

Температура $t, ^\circ\text{C}$	$p = 0,060 \text{ МПа}$			$p = 0,070 \text{ МПа}$		
	$t_s = 85,95 ^\circ\text{C},$ $\nu' = 0,0010333 \text{ м}^3/\text{кг}; \nu'' = 2,732 \text{ м}^3/\text{кг};$ $h' = 359,93 \text{ кДж/кг}; h'' = 2653,6 \text{ кДж/кг};$ $s' = 1,1454 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}; s'' = 7,5332 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$			$t_s = 89,96 ^\circ\text{C},$ $\nu' = 0,0010361 \text{ м}^3/\text{кг}; \nu'' = 2,3658 \text{ м}^3/\text{кг};$ $h' = 376,77 \text{ кДж/кг}; h'' = 2660,2 \text{ кДж/кг};$ $s' = 1,1921 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}; s'' = 7,4811 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$		
	$\nu, \text{ м}^3/\text{кг}$	$h, \text{ кДж/кг}$	$s, \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$	$\nu, \text{ м}^3/\text{кг}$	$h, \text{ кДж/кг}$	$s, \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$
0	0,0010002	0,0	-0,0001	0,0010002	0,0	-0,0001
10	0,0010002	42,0	0,1510	0,0010002	42,0	0,1510
20	0,0010017	83,9	0,2963	0,0010017	83,9	0,2963
30	0,0010043	125,7	0,4365	0,0010043	125,7	0,4365
40	0,0010078	167,5	0,5721	0,0010078	167,5	0,5721
50	0,0010121	209,3	0,7035	0,0010121	209,3	0,7035
60	0,0010171	251,1	0,8310	0,0010171	251,1	0,8310
70	0,0010228	293,0	0,9548	0,0010228	293,0	0,9548
80	<u>0,0010292</u>	<u>334,9</u>	<u>1,0752</u>	<u>0,0010292</u>	<u>334,9</u>	<u>1,0752</u>
90	2,765	2661,7	7,5554	2,366	2660,3	7,4813
100	2,845	2681,4	7,6091	2,435	2680,2	7,5354
120	3,003	2720,7	7,7116	2,571	2719,7	7,6386
140	3,160	2759,8	7,8086	2,706	2759,0	7,7360
160	3,317	2798,8	7,9009	2,841	2798,2	7,8286
180	3,473	2837,9	7,9890	2,975	2837,3	7,9170
200	3,628	2877,0	8,0735	3,108	2876,6	8,0017
250	4,016	2975,5	8,2714	3,441	2975,2	8,1997
300	4,402	3075,1	8,4532	3,772	3074,9	8,3817
350	4,788	3176,1	8,6221	4,103	3175,9	8,5507
400	5,174	3278,6	8,7803	4,434	3278,4	8,7090
450	5,559	3382,7	8,9294	4,764	3382,5	8,8582
500	5,944	3488,4	9,0708	5,095	3488,3	8,9995
600	6,714	3704,8	9,3340	5,755	3704,8	9,2628

Продолжение табл. П.3

Температура $t, ^\circ\text{C}$	$p = 0,080 \text{ МПа}$			$p = 0,090 \text{ МПа}$		
	$t_s = 93,51 ^\circ\text{C},$ $\nu' = 0,0010387 \text{ м}^3/\text{кг}; \nu'' = 2,0879 \text{ м}^3/\text{кг};$ $h' = 391,72 \text{ кДж/кг}; h'' = 2666,0 \text{ кДж/кг};$ $s' = 1,2330 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}; s'' = 7,4360 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$			$t_s = 96,71 ^\circ\text{C},$ $\nu' = 0,0010412 \text{ м}^3/\text{кг}; \nu'' = 1,6946 \text{ м}^3/\text{кг};$ $h' = 417,51 \text{ кДж/кг}; h'' = 2671,1 \text{ кДж/кг};$ $s' = 1,2696 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}; s'' = 7,3963 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$		
	$\nu, \text{ м}^3/\text{кг}$	$h, \text{ кДж/кг}$	$s, \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$	$\nu, \text{ м}^3/\text{кг}$	$h, \text{ кДж/кг}$	$s, \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$
0	0,0010002	0,0	- 0,0001	0,0010002	0,0	-0,0001
10	0,0010002	42,0	0,1510	0,0010002	42,0	0,1510
20	0,0010017	83,9	0,2963	0,0010017	83,9	0,2963
30	0,0010043	125,7	0,4365	0,0010043	125,7	0,4365
40	0,0010078	167,5	0,5721	0,0010078	167,5	0,5721
50	0,0010121	209,3	0,7035	0,0010121	209,3	0,7035
60	0,0010171	251,1	0,8310	0,0010171	251,1	0,8310
70	0,0010228	293,0	0,9548	0,0010228	293,0	0,9548
80	0,0010292	334,9	1,0752	0,0010292	335,0	1,0752
90	<u>0,0010361</u>	<u>376,9</u>	<u>1,1925</u>	<u>0,0010361</u>	<u>376,9</u>	<u>1,1925</u>
100	2,127	2679,0	7,4712	1,888	2677,8	7,4142
120	2,247	2718,8	7,5750	1,995	2717,8	7,5187
140	2,366	2758,2	7,6769	2,101	2757,4	7,6170
160	2,484	2797,5	7,7658	2,206	2796,9	7,7103
180	2,601	2836,8	7,8544	2,311	2836,2	7,7992
200	2,718	2876,1	7,9393	2,415	2875,6	7,8842
250	3,010	2974,8	8,1376	2,674	2974,5	8,0828
300	3,300	3074,6	8,3198	2,933	3074,4	8,2651
350	3,590	3175,7	8,4889	3,190	3175,5	8,4343
400	3,879	3278,3	8,6472	3,448	3278,1	8,5927
450	4,168	3382,4	8,7964	3,705	3382,3	8,7419
500	4,457	3488,2	8,9378	3,962	3488,0	8,8833
600	5,035	3704,7	9,2011	4,475	3704,6	9,1466

Продолжение табл. П.3

Температура $t, ^\circ\text{C}$	$p = 0,100 \text{ МПа}$			$p = 0,200 \text{ МПа}$		
	$t_s = 99,63 ^\circ\text{C},$ $\nu' = 0,0010434 \text{ м}^3/\text{кг}; \nu'' = 1,6946 \text{ м}^3/\text{кг};$ $h' = 417,51 \text{ кДж/кг}; h'' = 2675,7 \text{ кДж/кг};$ $s' = 1,3027 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}; s'' = 7,3608 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$			$t_s = 120,23 ^\circ\text{C},$ $\nu' = 0,0010608 \text{ м}^3/\text{кг}; \nu'' = 0,88592 \text{ м}^3/\text{кг};$ $h' = 504,7 \text{ кДж/кг}; h'' = 2706,9 \text{ кДж/кг};$ $s' = 1,5301 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}; s'' = 7,1286 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$		
	$\nu, \text{ м}^3/\text{кг}$	$h, \text{ кДж/кг}$	$s, \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$	$\nu, \text{ м}^3/\text{кг}$	$h, \text{ кДж/кг}$	$s, \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$
0	0,0010002	0,0	-0,0001	0,0010001	0,2	-0,0001
10	0,0010002	42,0	0,1510	0,0010002	42,2	0,1510
20	0,0010017	83,9	0,2963	0,0010016	84,0	0,2963
30	0,0010043	125,7	0,4365	0,0010042	125,8	0,4365
40	0,0010078	167,5	0,5721	0,0010077	167,6	0,5721
50	0,0010121	209,3	0,7035	0,0010120	209,3	0,7035
60	0,0010171	251,1	0,8310	0,0010171	251,1	0,8310
70	0,0010228	293,0	0,9548	0,0010228	293,0	0,9548
80	0,0010292	335,0	1,0752	0,0010291	335,0	1,0752
90	<u>0,0010361</u>	<u>376,9</u>	<u>1,1925</u>	0,0010361	376,9	1,1925
100	1,696	2676,5	7,3628	0,0010437	419,1	1,3068
120	1,793	2716,8	7,4681	<u>0,0010606</u>	<u>503,7</u>	<u>1,5276</u>
140	1,889	2756,6	7,5669	0,9104	2727,5	7,1803
160	1,984	2796,2	7,6605	0,9842	2789,5	7,3285
180	2,078	2835,7	7,7496	1,032	2830,1	7,4202
200	2,172	2875,2	7,8348	1,080	2870,4	7,5033
250	2,406	2974,2	8,0337	1,199	2970,8	7,7091
300	2,639	3074,1	8,2162	1,316	3071,6	7,8931
350	2,871	3175,3	8,3854	1,433	3173,3	8,0632
400	3,103	3278,0	8,5439	1,549	3276,4	8,2223
450	3,334	3382,2	8,6932	1,665	3380,8	8,3719
500	3,565	3487,9	8,8346	1,781	3486,8	8,5136
600	4,0280	3704,5	9,0979	2,013	3703,7	8,7774

Продолжение табл. П.3

Температура $t, ^\circ\text{C}$	$p = 0,300 \text{ МПа}$			$p = 0,400 \text{ МПа}$		
	$t_S = 133,54 ^\circ\text{C},$ $\nu' = 0,0010735 \text{ м}^3/\text{кг}; \nu'' = 0,60586 \text{ м}^3/\text{кг};$ $h' = 561,40 \text{ кДж/кг}; h'' = 2725,5 \text{ кДж/кг};$ $s' = 1,6717 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}; s'' = 6,9930 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$			$t_S = 143,62 ^\circ\text{C},$ $\nu' = 0,0010839 \text{ м}^3/\text{кг}; \nu'' = 0,46242 \text{ м}^3/\text{кг};$ $h' = 604,7 \text{ кДж/кг}; h'' = 2738,5 \text{ кДж/кг};$ $s' = 1,7764 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}; s'' = 6,8966 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$		
	$\nu, \text{ м}^3/\text{кг}$	$h, \text{ кДж/кг}$	$s, \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$	$\nu, \text{ м}^3/\text{кг}$	$h, \text{ кДж/кг}$	$s, \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$
0	0,0010001	0,3	-0,0001	0,0010000	0,4	-0,0001
10	0,0010001	42,3	0,1510	0,0010001	42,4	0,1510
20	0,0010016	84,1	0,2962	0,0010015	84,2	0,2962
30	0,0010042	125,9	0,4364	0,0010041	126,0	0,4364
40	0,0010077	167,7	0,5720	0,0010076	167,8	0,5720
50	0,0010120	209,5	0,7034	0,0010119	209,6	0,7033
60	0,0010170	251,3	0,8308	0,0010170	251,4	0,8308
70	0,0010227	293,2	0,9546	0,0010227	293,3	0,9546
80	0,0010291	335,1	1,0751	0,0010290	335,2	1,0750
90	0,0010360	377,1	1,1924	0,0010360	377,2	1,1923
100	0,0010436	419,2	1,3067	0,0010436	419,3	1,3066
120	<u>0,0010606</u>	<u>503,8</u>	<u>1,5275</u>	0,0010605	503,9	1,5274
140	0,6170	2739,6	7,0274	<u>0,0010800</u>	<u>589,1</u>	<u>1,7389</u>
160	0,6508	2782,4	7,1287	0,4839	2775,0	6,9825
180	0,6838	2824,3	7,2232	0,5094	2818,3	7,0802
200	0,7164	2865,6	7,3123	0,5343	2860,6	7,1715
250	0,7964	2967,5	7,5172	0,5952	2964,1	7,3795
300	0,8753	3069,2	7,7028	0,6548	3066,7	7,5668
350	0,9536	3171,4	7,8738	0,7139	3169,5	7,7387
400	1,031	3274,9	8,0335	0,7726	3273,3	7,8990
450	1,109	3379,6	8,1835	0,8310	3378,3	8,0495
500	1,187	3485,8	8,3255	0,8893	3484,7	8,1917
600	1,341	3702,9	8,5896	1,0055	3702,2	8,4561

Продолжение табл. П.3

Температура $t, ^\circ\text{C}$	$p = 0,500 \text{ МПа}$			$p = 0,600 \text{ МПа}$		
	$t_S = 151,85 ^\circ\text{C},$ $\nu' = 0,0010928 \text{ м}^3/\text{кг}; \nu'' = 0,37481 \text{ м}^3/\text{кг};$ $h' = 640,1 \text{ кДж/кг}; h'' = 2748,5 \text{ кДж/кг};$ $s' = 1,8604 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}; s'' = 6,8215 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$			$t_S = 158,84 ^\circ\text{C},$ $\nu' = 0,0011009 \text{ м}^3/\text{кг}; \nu'' = 0,31556 \text{ м}^3/\text{кг};$ $h' = 670,4 \text{ кДж/кг}; h'' = 2756,4 \text{ кДж/кг};$ $s' = 1,9308 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}; s'' = 6,7598 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$		
	$\nu, \text{ м}^3/\text{кг}$	$h, \text{ кДж/кг}$	$s, \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$	$\nu, \text{ м}^3/\text{кг}$	$h, \text{ кДж/кг}$	$s, \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$
0	0,0010000	0,5	-0,0001	0,0009999	0,6	-0,0001
10	0,0010000	42,5	0,1509	0,0010000	42,6	0,1509
20	0,0010015	84,3	0,2962	0,0010014	84,4	0,2963
30	0,0010041	126,1	0,4364	0,0010040	126,2	0,4364
40	0,0010076	167,9	0,5719	0,0010075	168,0	0,5719
50	0,0010119	209,7	0,7033	0,0010118	209,8	0,7032
60	0,0010169	251,5	0,8307	0,0010169	251,6	0,8307
70	0,0010226	293,4	0,9545	0,0010226	293,4	0,9545
80	0,0010290	335,3	1,0750	0,0010289	335,4	1,0749
90	0,0010359	377,3	1,1922	0,0010359	377,3	1,1921
100	0,0010435	419,4	1,3066	0,0010434	419,4	1,3065
120	0,0010605	503,9	1,5273	0,0010604	504,0	1,5272
140	<u>0,0010800</u>	<u>589,2</u>	<u>1,7388</u>	<u>0,0010799</u>	<u>589,3</u>	<u>1,7387</u>
160	0,3836	2767,4	6,8653	0,3166	2759,2	6,7662
180	0,4046	2812,1	6,9664	0,3347	2805,6	6,8711
200	0,4249	2855,4	7,0603	0,3521	2850,2	6,9674
250	0,4744	2960,7	7,2716	0,3939	2957,2	7,1825
300	0,5226	3064,2	7,4605	0,4344	3061,7	7,3731
350	0,5701	3167,5	7,6334	0,4742	3165,6	7,5470
400	0,6172	3271,8	7,7944	0,5137	3270,3	7,7086
450	0,6641	3377,0	7,9452	0,5529	3375,8	7,8598
500	0,7109	3483,6	8,0877	0,5919	3482,6	8,0026
600	0,8040	3701,4	8,3525			

Продолжение табл. П.3

Температура $t, ^\circ\text{C}$	$p = 0,700 \text{ МПа}$			$p = 0,800 \text{ МПа}$		
	$t_S = 164,96 ^\circ\text{C},$ $\nu' = 0,0011082 \text{ м}^3/\text{кг}; \nu'' = 0,27274 \text{ м}^3/\text{кг};$ $h' = 697,1 \text{ кДж/кг}; h'' = 2762,9 \text{ кДж/кг};$ $s' = 1,9918 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}; s'' = 6,7774 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$			$t_S = 170,42 ^\circ\text{C},$ $\nu' = 0,0011150 \text{ м}^3/\text{кг}; \nu'' = 0,24030 \text{ м}^3/\text{кг};$ $h' = 720,9 \text{ кДж/кг}; h'' = 2764,4 \text{ кДж/кг};$ $s' = 2,0457 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}; s'' = 6,6618 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$		
	$\nu, \text{ м}^3/\text{кг}$	$h, \text{ кДж/кг}$	$s, \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$	$\nu, \text{ м}^3/\text{кг}$	$h, \text{ кДж/кг}$	$s, \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$
0	0,0009999	0,7	-0,0001	0,0009998	0,8	-0,0001
10	0,0009999	42,7	0,1509	0,0009999	42,8	0,1509
20	0,0010014	84,5	0,2962	0,0010014	84,6	0,2961
30	0,0010040	126,3	0,4363	0,0010040	126,4	0,4363
40	0,0010075	168,1	0,5718	0,0010075	168,2	0,5718
50	0,0010118	209,9	0,7032	0,0010118	209,9	0,7031
60	0,0010168	251,7	0,8306	0,0010168	251,7	0,8306
70	0,0010225	293,5	0,9544	0,0010225	293,6	0,9544
80	0,0010289	335,4	1,0748	0,0010288	335,5	1,0748
90	0,0010358	377,4	1,1921	0,0010358	377,5	1,1920
100	0,0010434	419,5	1,3064	0,0010433	419,6	1,3063
120	0,0010603	504,1	1,5271	0,0010603	504,1	1,5270
140	0,0010798	589,3	1,7386	0,0010798	589,4	1,7385
160	<u>0,0011022</u>	<u>675,5</u>	<u>1,9424</u>	<u>0,0011021</u>	<u>675,6</u>	<u>1,9422</u>
180	0,2847	2798,9	6,7883	0,2471	2792,0	6,7144
200	0,2999	2844,8	6,8873	0,2608	2839,2	6,8164
250	0,3363	2953,7	7,1062	0,2932	2950,1	7,0393
300	0,3714	3059,1	7,2987	0,3241	3056,5	7,2337
350	0,4057	3163,6	7,4735	0,3544	3161,7	7,4096
400	0,4397	3268,7	7,6357	0,3842	3267,2	7,5724
450	0,4734	3374,5	7,7873	0,4138	3373,3	7,7244
500	0,5070	3481,5	7,9304	0,44,32	3480,5	7,8677
600	0,57372	3699,8	8,1858	0,5018	3699,0	8,1335

Продолжение табл. П.3

Температура $t, ^\circ\text{C}$	$p = 0,900 \text{ МПа}$			$p = 1,00 \text{ МПа}$		
	$t_S = 175,36 ^\circ\text{C},$ $\nu' = 0,0011213 \text{ м}^3/\text{кг}; \nu'' = 0,21484 \text{ м}^3/\text{кг};$ $h' = 742,6 \text{ кДж/кг}; h'' = 2773,0 \text{ кДж/кг};$ $s' = 2,0941 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}; s'' = 6,6212 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$			$t_S = 179,88 ^\circ\text{C},$ $\nu' = 0,0011274 \text{ м}^3/\text{кг}; \nu'' = 0,19430 \text{ м}^3/\text{кг};$ $h' = 762,6 \text{ кДж/кг}; h'' = 2777,0 \text{ кДж/кг};$ $s' = 2,1382 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}; s'' = 6,5847 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$		
	$\nu, \text{ м}^3/\text{кг}$	$h, \text{ кДж/кг}$	$s, \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$	$\nu, \text{ м}^3/\text{кг}$	$h, \text{ кДж/кг}$	$s, \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$
0	0,0009998	0,9	-0,0001	0,0009997	1,0	-0,0001
10	0,0009998	42,9	0,1509	0,0009998	43,0	0,1509
20	0,0010013	84,7	0,2961	0,0010013	84,8	0,2961
30	0,0010039	126,5	0,4362	0,0010039	126,6	0,4362
40	0,0010074	168,2	0,5718	0,0010074	168,3	0,5717
50	0,0010117	210,0	0,7031	0,0010117	210,1	0,7030
60	0,0010167	251,8	0,8305	0,0010167	251,9	0,8305
70	0,0010224	293,7	0,9543	0,0010224	293,8	0,9542
80	0,0010287	335,6	1,0747	0,0010287	335,7	1,0746
90	0,0010357	377,6	1,1919	0,0010357	377,7	1,1918
100	0,0010433	419,7	1,3062	0,0010432	419,7	1,3062
120	0,0010602	504,2	1,5270	0,0010602	504,3	1,5269
140	0,0010797	589,5	1,7384	0,0010796	589,5	1,7383
160	<u>0,0011020</u>	<u>675,6</u>	<u>1,9421</u>	<u>0,0011019</u>	<u>675,7</u>	<u>1,9420</u>
180	0,2178	2784,8	6,6473	0,1944	2777,3	6,5854
200	0,2304	2833,5	6,7526	0,2059	2827,5	6,6940
250	0,2596	2946,5	6,9797	0,2327	2942,8	6,9256
300	0,2874	3054,0	7,1759	0,2580	3051,3	7,1239
350	0,3144	3159,7	7,3528	0,2825	3157,7	7,3018
400	0,3411	3265,6	7,5163	0,3066	3264,0	7,4606
450	0,3675	3372,0	7,6687	0,3304	3370,7	7,6188
500	0,3937	3479,4	7,8123	0,3540	3478,3	7,7627
600	0,4458	3698,2	8,0785	0,4010	3697,4	8,0292

Продолжение табл. П.3

Температура $t, ^\circ\text{C}$	$p = 1,500 \text{ МПа}$			$p = 2,000 \text{ МПа}$		
	$t_S = 198,28 ^\circ\text{C},$ $\nu' = 0,0011538 \text{ м}^3/\text{кг}; \nu'' = 0,13165 \text{ м}^3/\text{кг};$ $h' = 844,6 \text{ кДж/кг}; h'' = 2790,4 \text{ кДж/кг};$ $s' = 2,3144 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}; s'' = 6,4418 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$			$t_S = 212,37 ^\circ\text{C},$ $\nu' = 0,0011766 \text{ м}^3/\text{кг}; \nu'' = 0,09953 \text{ м}^3/\text{кг};$ $h' = 903,6 \text{ кДж/кг}; h'' = 2796,4 \text{ кДж/кг};$ $s' = 2,4468 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}; s'' = 6,3373 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$		
	$\nu, \text{ м}^3/\text{кг}$	$h, \text{ кДж/кг}$	$s, \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$	$\nu, \text{ м}^3/\text{кг}$	$h, \text{ кДж/кг}$	$s, \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$
0	0,0009995	1,5	0,0000	0,0009992	2,0	0,0000
10	0,0009995	43,5	0,1509	0,0009993	43,9	0,1509
20	0,0010010	85,3	0,2960	0,0010008	85,7	0,2960
30	0,0010036	127,0	0,4360	0,0010034	127,5	0,4360
40	0,0010071	168,8	0,5715	0,0010069	169,2	0,5715
50	0,0010114	210,6	0,7028	0,0010112	211,0	0,7028
60	0,0010165	252,3	0,8302	0,0010162	252,7	0,8302
70	0,0010222	294,2	0,9539	0,0010219	294,6	0,9539
80	0,0010285	336,1	1,0743	0,0010282	336,5	1,0743
90	0,0010354	378,0	1,1915	0,0010352	378,4	1,1915
100	0,0010430	420,1	1,3058	0,0010427	420,5	1,3058
120	0,0010599	504,6	1,5264	0,0010596	505,0	1,5264
140	0,0010793	589,8	1,7378	0,0010790	590,2	1,7378
160	0,0011016	676,0	1,9414	0,0011012	676,3	1,9414
180	<u>0,0011271</u>	<u>763,4</u>	<u>2,1386</u>	0,0011266	763,6	2,1386
200	0,1324	2795,3	6,4522	<u>0,0011560</u>	<u>852,6</u>	<u>2,3300</u>
250	0,1520	2923,4	6,7100	0,1115	2902,5	6,5460
300	0,1697	3037,9	6,9192	0,1255	3024,0	6,7679
350	0,1866	3147,6	7,1026	0,1386	3137,2	6,9574
400	0,2030	3256,1	7,2701	0,1512	3248,1	7,1285
450	0,2191	3364,2	7,4250	0,1635	3357,7	7,2855
500	0,2351	3472,9	7,5703	0,1756	3467,4	7,4323
600	0,2667	3693,5	7,8386	0,1995	3689,5	7,7024

Продолжение табл. П.3

Температура $t, ^\circ\text{C}$	$p = 2,500 \text{ МПа}$			$p = 3,000 \text{ МПа}$		
	$t_S = 223,94 ^\circ\text{C},$ $\nu' = 0,0011972 \text{ м}^3/\text{кг}; \nu'' = 0,09953 \text{ м}^3/\text{кг};$ $h' = 962,0 \text{ кДж/кг}; h'' = 2796,4 \text{ кДж/кг};$ $s' = 2,5543 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}; s'' = 6,2536 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$			$t_S = 233,34 ^\circ\text{C},$ $\nu' = 0,0012163 \text{ м}^3/\text{кг}; \nu'' = 0,06662 \text{ м}^3/\text{кг};$ $h' = 1008,4 \text{ кДж/кг}; h'' = 2801,9 \text{ кДж/кг};$ $s' = 2,6555 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}; s'' = 6,1882 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$		
	$\nu, \text{ м}^3/\text{кг}$	$h, \text{ кДж/кг}$	$s, \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$	$\nu, \text{ м}^3/\text{кг}$	$h, \text{ кДж/кг}$	$s, \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$
0	0,0009990	2,5	0,00004	0,0009987	3,0	0,0001
10	0,0009991	44,4	0,1508	0,0009988	44,9	0,1507
20	0,0010006	86,2	0,2958	0,0010004	86,7	0,2957
30	0,0010032	127,9	0,4357	0,0010030	128,4	0,4356
40	0,0010067	169,7	0,5711	0,0010065	170,1	0,5709
50	0,0010110	211,4	0,7023	0,0010108	211,8	0,7021
60	0,0010160	253,2	0,8297	0,0010158	253,6	0,8294
70	0,0010217	295,0	0,9533	0,0010215	295,4	0,9530
80	0,0010280	336,9	1,0736	0,0010278	337,3	1,0733
90	0,0010349	378,8	1,1908	0,0010347	379,2	1,1904
100	0,0010424	420,9	1,3050	0,0010422	421,2	1,3046
120	0,0010593	505,3	1,5255	0,0010590	505,7	1,5250
140	0,0010787	590,5	1,7368	0,0010783	590,8	1,7362
160	0,0011008	676,6	1,9402	0,0011005	676,9	1,9396
180	0,0011262	763,9	2,1372	0,0011258	764,1	2,1366
200	<u>0,0011555</u>	<u>852,8</u>	<u>2,3292</u>	<u>0,0011550</u>	<u>853,0</u>	<u>2,3284</u>
250	0,08701	2879,9	6,4087	0,07058	2855,2	6,2867
300	0,09892	3009,0	6,6454	0,08116	2994,2	6,5408
350	0,1098	3126,6	6,8415	0,09053	3115,7	6,7443
400	0,1201	3239,9	7,0165	0,09933	3231,6	7,9231
450	0,1301	3351,0	7,1758	0,1078	3344,4	7,0847
500	0,1399	3461,9	7,3240	0,1161	3456,4	7,2345
600	0,1592	3685,5	7,5960	0,1324	3681,5	7,5084

Продолжение табл. П.3

Температура $t, ^\circ\text{C}$	$p = 3,500 \text{ МПа}$			$p = 4,000 \text{ МПа}$		
	$t_S = 242,54 ^\circ\text{C},$ $\nu' = 0,0012345 \text{ м}^3/\text{кг}; \nu'' = 0,05702 \text{ м}^3/\text{кг};$ $h' = 1049,8 \text{ кДж/кг}; h'' = 2801,3 \text{ кДж/кг};$ $s' = 2,7253 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}; s'' = 6,1218 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$			$t_S = 250,33 ^\circ\text{C},$ $\nu' = 0,0012521 \text{ м}^3/\text{кг}; \nu'' = 0,04974 \text{ м}^3/\text{кг};$ $h' = 1087,5 \text{ кДж/кг}; h'' = 2799,4 \text{ кДж/кг};$ $s' = 2,7967 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}; s'' = 6,0670 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$		
	$\nu, \text{ м}^3/\text{кг}$	$h, \text{ кДж/кг}$	$s, \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$	$\nu, \text{ м}^3/\text{кг}$	$h, \text{ кДж/кг}$	$s, \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$
0	0,0009985	3,5	0,0001	0,0009982	4,0	0,0002
10	0,0009986	45,4	0,1507	0,0009984	45,9	0,1506
20	0,0010001	87,1	0,2956	0,0009999	87,6	0,2955
30	0,0010028	128,8	0,4354	0,0010025	129,3	0,4353
40	0,0010063	170,5	0,5708	0,0010060	171,0	0,5706
50	0,0010106	212,3	0,7019	0,0010103	212,7	0,7016
60	0,0010156	254,0	0,8291	0,0010153	254,4	0,8288
70	0,0010212	295,8	0,9527	0,0010210	296,2	0,9524
80	0,0010275	337,7	1,0730	0,0010273	338,1	1,0726
90	0,0010344	379,6	1,1900	0,0010342	380,0	1,1897
100	0,0010419	421,6	1,3042	0,0010417	422,0	1,3038
120	0,0010587	506,0	1,5244	0,0010584	506,4	1,5242
140	0,0010780	591,1	1,7357	0,0010777	591,5	1,7352
160	0,0011001	677,2	1,9390	0,0010997	677,5	1,9385
180	0,0011254	764,4	2,1359	0,0011249	764,6	2,1352
200	<u>0,0011545</u>	<u>853,2</u>	<u>2,3273</u>	0,0011540	853,4	2,3268
250	0,05871	2828,1	6,1734	<u>0,0012512</u>	<u>1085,8</u>	<u>2,7936</u>
300	0,06843	2978,2	6,4480	0,05885	2961,5	6,3634
350	0,07678	3104,6	6,6595	0,06645	3093,1	6,5838
400	0,08451	3223,1	6,8426	0,07339	3214,5	6,7713
450	0,09192	3337,6	7,0066	0,07999	3330,7	6,9379
500	0,09913	3450,8	7,1580	0,08638	3445,2	7,0909
600	0,1132	3677,5	7,4337	0,09879	3673,4	7,3686

Продолжение табл. П.3

Температура $t, ^\circ\text{C}$	$p = 4,500 \text{ МПа}$			$p = 5,000 \text{ МПа}$		
	$t_S = 257,41 ^\circ\text{C},$ $\nu' = 0,0012691 \text{ м}^3/\text{кг}; \nu'' = 0,04402 \text{ м}^3/\text{кг};$ $h' = 1122,2 \text{ кДж/кг}; h'' = 2796,5 \text{ кДж/кг};$ $s' = 2,8614 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}; s'' = 6,0171 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$			$t_S = 263,92 ^\circ\text{C},$ $\nu' = 0,0012858 \text{ м}^3/\text{кг}; \nu'' = 0,03941 \text{ м}^3/\text{кг};$ $h' = 1154,6 \text{ кДж/кг}; h'' = 2792,8 \text{ кДж/кг};$ $s' = 2,9209 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}; s'' = 5,9712 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$		
	$\nu, \text{ м}^3/\text{кг}$	$h, \text{ кДж/кг}$	$s, \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$	$\nu, \text{ м}^3/\text{кг}$	$h, \text{ кДж/кг}$	$s, \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$
0	0,0009980	4,5	0,0002	0,0009977	5,1	0,0002
10	0,0009981	46,4	0,1506	0,0009979	46,9	0,1505
20	0,0009997	88,1	0,2954	0,0009995	88,6	0,2952
30	0,0010023	129,8	0,4351	0,0010021	130,2	0,4350
40	0,0010058	171,4	0,5704	0,0010056	171,9	0,5702
50	0,0010101	213,1	0,7014	0,0010099	213,6	0,7012
60	0,0010151	254,8	0,8286	0,0010149	255,3	0,8283
70	0,0010208	296,6	0,9521	0,0010205	297,0	0,9518
80	0,0010270	338,4	1,0723	0,0010268	338,8	1,0720
90	0,0010339	380,4	1,1893	0,0010337	380,7	1,1890
100	0,0010414	422,4	1,3034	0,0010412	422,7	1,3030
120	0,0010582	506,7	1,5237	0,0010579	507,1	1,5232
140	0,0010774	591,8	1,7347	0,0010771	592,1	1,7342
160	0,0010993	677,8	1,9379	0,0010990	677,8	1,9373
180	0,0011245	764,9	2,1345	0,0011241	764,9	2,1339
200	0,0011534	853,6	2,3260	0,0011530	853,6	2,3253
250	<u>0,0012503</u>	<u>1085,8</u>	<u>2,7923</u>	<u>0,0012494</u>	<u>1085,8</u>	<u>2,7911</u>
300	0,05840	2943,9	6,2848	0,04532	2925,4	6,2104
350	0,06473	3081,3	6,5149	0,05194	3069,2	6,4513
400	0,07070	3205,8	6,7071	0,05780	3196,9	6,6486
450	0,06473	3323,8	6,8763	0,06327	3316,8	6,8204
500	0,07646	3439,5	7,0310	0,06853	3433,8	6,9768
600	0,08760	3669,4	7,3107	0,07864	3665,4	7,2586

Продолжение табл. П.3

Температура $t, ^\circ\text{C}$	$p = 5,600 \text{ МПа}$			$p = 6,000 \text{ МПа}$		
	$t_S = 279,09 ^\circ\text{C}$			$t_S = 275,56 ^\circ\text{C}$		
	$\nu' = 0,0013056 \text{ м}^3/\text{кг}; \nu'' = 0,03492 \text{ м}^3/\text{кг};$ $h' = 1191,0 \text{ кДж/кг}; h'' = 2787,4 \text{ кДж/кг};$ $s' = 2,9867 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}; s'' = 5,9199 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$			$\nu' = 0,0013187 \text{ м}^3/\text{кг}; \nu'' = 0,03241 \text{ м}^3/\text{кг};$ $h' = 1213,9 \text{ кДж/кг}; h'' = 2783,3 \text{ кДж/кг};$ $s' = 3,0277 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}; s'' = 5,8878 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$		
	$\nu, \text{ м}^3/\text{кг}$	$h, \text{ кДж/кг}$	$s, \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$	$\nu, \text{ м}^3/\text{кг}$	$h, \text{ кДж/кг}$	$s, \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$
0	0,0009974	5,7	0,0003	0,0009972	6,1	0,0003
10	0,0009976	47,4	0,1505	0,0009974	47,8	0,1505
20	0,0009992	89,1	0,2951	0,0009990	89,5	0,2951
30	0,0010018	130,8	0,4348	0,0010016	131,1	0,4347
40	0,0010053	172,4	0,5699	0,0010051	172,7	0,5698
50	0,0010096	214,1	0,7009	0,0010094	214,4	0,7007
60	0,0010146	255,8	0,8280	0,0010144	256,1	0,8278
70	0,0010203	297,5	0,9515	0,0010201	297,8	0,9512
80	0,0010265	339,3	1,0716	0,0010263	339,6	1,0713
90	0,0010334	381,2	1,1885	0,0010332	381,5	1,1882
100	0,0010408	423,2	1,3026	0,0010406	423,5	1,3023
120	0,0010575	507,5	1,5227	0,0010573	507,8	1,5224
140	0,0010767	592,5	1,7336	0,0010764	592,8	1,7331
160	0,0010986	678,4	1,9366	0,0010983	678,6	1,9361
180	0,0011236	765,5	2,1331	0,0011232	765,7	2,1325
200	0,0011524	854,0	2,3243	0,0011519	854,2	2,3237
250	<u>0,0012483</u>	<u>2901,7</u>	<u>2,7897</u>	<u>0,0012476</u>	<u>1085,8</u>	<u>2,7887</u>
300	0,03946	3054,2	6,1249	0,03616	2885,0	6,0693
350	0,04570	3186,0	6,3803	0,04223	3043,9	6,3356
400	0,05110	3308,3	6,5840	0,04738	3178,6	6,5438
450	0,05610	3426,9	6,7593	0,05212	3302,6	6,7214
500	0,06087	3660,4	6,9178	0,05662	3422,2	6,8814
600	0,07000	3894,0	7,2020	0,06521	3657,2	7,673

Продолжение табл. П.3

Температура $t, ^\circ\text{C}$	$p = 6,600 \text{ МПа}$			$p = 7,000 \text{ МПа}$		
	$t_S = 281,85 ^\circ\text{C},$ $\nu' = 0,0013383 \text{ м}^3/\text{кг}; \nu'' = 0,02920 \text{ м}^3/\text{кг};$ $h' = 1246,8 \text{ кДж/кг}; h'' = 2776,4 \text{ кДж/кг};$ $s' = 3,0858 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}; s'' = 5,8419 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$			$t_S = 285,80 ^\circ\text{C},$ $\nu' = 0,0013514 \text{ м}^3/\text{кг}; \nu'' = 0,02734 \text{ м}^3/\text{кг};$ $h' = 1267,7 \text{ кДж/кг}; h'' = 2771,4 \text{ кДж/кг};$ $s' = 3,1225 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}; s'' = 5,8126 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$		
	$\nu, \text{ м}^3/\text{кг}$	$h, \text{ кДж/кг}$	$s, \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$	$\nu, \text{ м}^3/\text{кг}$	$h, \text{ кДж/кг}$	$s, \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$
0	0,0009969	6,7	0,0003	0,0009967	7,1	0,0004
10	0,0009972	48,4	0,1504	0,0009970	48,8	0,1504
20	0,0009987	90,0	0,2949	0,0009986	90,4	0,2948
30	0,0010014	131,7	0,4345	0,0010012	132,0	0,4344
40	0,0010049	173,3	0,5696	0,0010047	173,6	0,5694
50	0,0010092	214,9	0,7004	0,0010090	215,3	0,7003
60	0,0010142	256,6	0,8275	0,0010140	256,9	0,8273
70	0,0010198	298,3	0,9509	0,0010196	298,7	0,9506
80	0,0010260	340,1	1,0709	0,0010259	340,4	1,0707
90	0,0010329	382,0	1,1878	0,0010327	382,3	1,1875
100	0,0010403	423,9	1,3018	0,0010401	424,2	1,3015
120	0,0010570	508,2	1,5218	0,0010567	508,5	1,5215
140	0,0010760	593,2	1,7326	0,0010758	593,4	1,7321
160	0,0010978	679,0	1,9354	0,0010976	679,2	1,9350
180	0,0011227	766,0	2,1317	0,0011224	766,2	2,1312
200	0,0011513	854,5	2,3228	0,0011510	854,6	2,3222
250	<u>0,0012465</u>	<u>1085,8</u>	<u>2,7873</u>	<u>0,0012458</u>	<u>1085,8</u>	<u>2,7864</u>
300	0,03192	2858,2	5,9870	0,02946	2839,2	5,9322
350	0,03779	3027,9	6,2716	0,03524	3017,0	6,2306
400	0,04263	3167,4	6,4870	0,03992	3159,7	6,4511
450	0,04704	3293,9	6,6684	0,04414	3288,0	6,6350
500	0,05120	3415,2	6,8306	0,04810	3410,5	6,7988
600	0,05910	3652,2	7,1190	0,05561	3649,0	7,0890

Температура $t, ^\circ\text{C}$	$p = 7,600 \text{ МПа}$			$p = 8,000 \text{ МПа}$		
	$t_S = 291,42 ^\circ\text{C},$ $\nu' = 0,0013711 \text{ м}^3/\text{кг}; \nu'' = 0,02492 \text{ м}^3/\text{кг};$ $h' = 1298,0 \text{ кДж/кг}; h'' = 2763,3 \text{ кДж/кг};$ $s' = 3,1749 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}; s'' = 5,7703 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$			$t_S = 294,98 ^\circ\text{C},$ $\nu' = 0,0013843 \text{ м}^3/\text{кг}; \nu'' = 0,02349 \text{ м}^3/\text{кг};$ $h' = 1317,5 \text{ кДж/кг}; h'' = 2757,5 \text{ кДж/кг};$ $s' = 3,2083 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}; s'' = 5,7430 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$		
	$\nu, \text{ м}^3/\text{кг}$	$h, \text{ кДж/кг}$	$s, \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$	$\nu, \text{ м}^3/\text{кг}$	$h, \text{ кДж/кг}$	$s, \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$
0	0,0009964	7,7	0,0004	0,0009962	8,1	0,0004
10	0,0009967	49,4	0,1503	0,0009965	49,8	0,1503
20	0,0009983	91,0	0,2947	0,0009981	91,4	0,2946
30	0,0010009	132,6	0,4342	0,0010008	132,9	0,4340
40	0,0010045	174,2	0,5691	0,0010043	174,5	0,5690
50	0,0010087	215,8	0,7000	0,0010086	216,1	0,6998
60	0,0010137	257,4	0,8269	0,0010135	257,8	0,8267
70	0,0010193	299,1	0,9503	0,0010192	299,5	0,9500
80	0,0010256	340,9	1,0703	0,0010254	341,2	1,0700
90	0,0010324	382,8	1,1871	0,0010322	383,1	1,1868
100	0,0010398	424,7	1,3010	0,0010396	425,0	1,3007
120	0,0010564	508,9	1,5209	0,0010562	509,2	1,5206
140	0,0010754	593,8	1,7315	0,0010752	594,1	1,7311
160	0,0010971	679,6	1,9343	0,0010968	679,8	1,9338
180	0,0011219	766,5	2,1304	0,0011216	766,7	2,1299
200	0,0011504	854,9	2,3213	0,0011500	855,1	2,3207
250	<u>0,0012448</u>	<u>1085,8</u>	<u>2,7849</u>	<u>0,0012440</u>	<u>1085,8</u>	<u>2,7840</u>
300	0,02620	2808,0	5,8489	0,02425	2785,4	5,7918
350	0,03190	3000,0	6,1710	0,02995	2988,3	6,1324
400	0,03638	3148,0	6,3998	0,03431	3140,1	6,3670
450	0,04036	3279,1	6,5877	0,03815	3273,1	6,5577
500	0,04407	3403,3	6,7538	0,04172	3398,5	6,7254
600	0,05106	3644,0	7,0467	0,04841	3640,7	7,0201

Температура $t, ^\circ\text{C}$	$p = 8,600 \text{ МПа}$			$p = 9,000 \text{ МПа}$		
	$t_S = 300,07 ^\circ\text{C},$			$t_S = \quad ^\circ\text{C},$		
	$\nu' = 0,0014043 \text{ м}^3/\text{кг}; \nu'' = 0,02159 \text{ м}^3/\text{кг};$ $h' = 1345,8 \text{ кДж/кг}; h'' = 2748,3 \text{ кДж/кг};$ $s' = 3,2565 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}; s'' = 5,7032 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$			$\nu' = 0,0014179 \text{ м}^3/\text{кг}; \nu'' = 0,02046 \text{ м}^3/\text{кг};$ $h' = 1364,2 \text{ кДж/кг}; h'' = 2741,8 \text{ кДж/кг};$ $s' = 3,2875 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}; s'' = 5,6773 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$		
	$\nu, \text{ м}^3/\text{кг}$	$h, \text{ кДж/кг}$	$s, \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$	$\nu, \text{ м}^3/\text{кг}$	$h, \text{ кДж/кг}$	$s, \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$
0	0,0009959	8,7	0,0004	0,0009958	9,1	0,0005
10	0,0009962	50,4	0,1502	0,0009960	50,7	0,1502
20	0,0009978	91,9	0,2945	0,0009977	92,3	0,2944
30	0,0010005	133,5	0,4338	0,0010003	133,8	0,4337
40	0,0010040	175,0	0,5688	0,0010038	175,4	0,5686
50	0,0010083	216,6	0,6995	0,0010081	217,0	0,6993
60	0,0010133	258,3	0,8264	0,0010131	258,6	0,8262
70	0,0010189	300,0	0,9497	0,0010187	300,3	0,9494
80	0,0010251	341,7	1,0696	0,0010249	342,0	1,0694
90	0,0010319	383,5	1,1864	0,0010317	383,8	1,1861
100	0,0010393	425,4	1,3003	0,0010391	425,8	1,3000
120	0,0010558	509,6	1,5200	0,0010556	509,9	1,5197
140	0,0010748	594,5	1,7305	0,0010745	594,7	1,7301
160	0,0010964	680,2	1,9331	0,0010961	680,4	1,9326
180	0,0011211	767,0	2,1291	0,0011207	767,2	2,1286
200	0,0011494	855,3	2,3197	0,0011490	855,5	2,3191
250	0,0012430	1085,8	2,7826	0,0012423	1085,9	2,7817
300	<u>0,0014040</u>	<u>1345,4</u>	<u>3,2558</u>	<u>0,0014022</u>	<u>1344,9</u>	<u>3,2539</u>
350	0,02735	2970,1	6,0756	0,02579	2957,5	6,0383
400	0,03156	3127,9	6,3196	0,02993	3119,7	6,2891
450	0,03522	3264,0	6,5147	0,03348	3257,9	6,4872
500	0,03860	3391,3	6,6850	0,03675	3386,4	6,6592
600	0,04490	3635,7	6,9824	0,04281	3632,4	6,9285

Температура $t, ^\circ\text{C}$	$p = 9,600 \text{ МПа}$			$p = 10,00 \text{ МПа}$		
	$t_S = 307,98 ^\circ\text{C},$ $\nu' = 0,0014385 \text{ м}^3/\text{кг}; \nu'' = 0,01893 \text{ м}^3/\text{кг};$ $h' = 1391,1 \text{ кДж/кг}; h'' = 2731,6 \text{ кДж/кг};$ $s' = 3,3325 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}; s'' = 5,6393 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$			$t_S = 310,96 ^\circ\text{C},$ $\nu' = 0,0014526 \text{ м}^3/\text{кг}; \nu'' = 0,01800 \text{ м}^3/\text{кг};$ $h' = 1408,6 \text{ кДж/кг}; h'' = 2724,4 \text{ кДж/кг};$ $s' = 3,3616 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}; s'' = 5,6143 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$		
	$\nu, \text{ м}^3/\text{кг}$	$h, \text{ кДж/кг}$	$s, \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$	$\nu, \text{ м}^3/\text{кг}$	$h, \text{ кДж/кг}$	$s, \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$
0	0,0009955	9,7	0,0005	0,0009953	10,1	0,0005
10	0,0009958	51,3	0,1501	0,0009956	51,7	1,1500
20	0,0009974	92,8	0,2942	0,0009972	93,2	0,2942
30	0,0000001	134,4	0,4335	0,0009999	134,7	0,4334
40	0,0010036	175,9	0,5684	0,0010034	176,3	0,5682
50	0,0010079	217,5	0,6990	0,0010077	217,8	0,6989
60	0,0010128	259,1	0,8259	0,0010126	259,4	0,8257
70	0,0010184	300,8	0,9491	0,0010182	301,1	0,9489
80	0,0010246	342,5	1,0690	0,0010244	342,8	1,0687
90	0,0010314	384,3	1,1857	0,0010312	384,6	1,1854
100	0,0010388	426,2	1,2995	0,0010386	426,5	1,2992
120	0,0010553	510,4	1,5192	0,0010551	510,6	1,5188
140	0,0010742	595,1	1,7295	0,0010739	595,4	1,7291
160	0,0010957	680,8	1,9320	0,0010954	681,0	1,9315
180	0,0011202	766,7	2,1278	0,0011199	767,8	2,1272
200	0,0011484	855,8	2,3182	0,0011480	855,9	2,3176
250	0,0012413	1085,9	2,7803	0,0012406	3085,9	2,7794
300	<u>0,0013996</u>	<u>1344,2</u>	<u>3,2512</u>	<u>0,0013978</u>	<u>1343,7</u>	<u>3,2494</u>
350	0,02369	2937,9	5,9830	0,02242	2924,2	5,9464
400	0,02773	3107,1	6,2447	0,02641	3098,5	6,2158
450	0,03114	3248,5	6,4475	0,02974	3242,2	6,4220
500	0,03426	3379,1	6,6221	0,03277	3374,1	6,5984
600	0,04001	3627,3	6,9243	0,03833	3624,0	6,9025

Продолжение табл. П.3

Температура $t, ^\circ\text{C}$	$p = 11,00 \text{ МПа}$			$p = 12,00 \text{ МПа}$		
	$t_S = 318,04 ^\circ\text{C},$ $\nu' = 0,0014887 \text{ м}^3/\text{кг}; \nu'' = 0,01597 \text{ м}^3/\text{кг};$ $h' = 1451,2 \text{ кДж/кг}; h'' = 2705,4 \text{ кДж/кг};$ $s' = 3,4316 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К}); s'' = 5,531 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$			$t_S = 324,64 ^\circ\text{C},$ $\nu' = 0,0015267 \text{ м}^3/\text{кг}; \nu'' = 0,01425 \text{ м}^3/\text{кг};$ $h' = 1492,6 \text{ кДж/кг}; h'' = 2684,8 \text{ кДж/кг};$ $s' = 3,4986 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К}); s'' = 5,4930 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$		
	$\nu, \text{ м}^3/\text{кг}$	$h, \text{ кДж/кг}$	$s, \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$	$\nu, \text{ м}^3/\text{кг}$	$h, \text{ кДж/кг}$	$s, \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$
0	0,0009948	11,1	0,0006	0,0009943	12,1	0,0006
10	0,0009951	52,7	0,1499	0,0009947	53,6	0,1498
20	0,0009968	94,2	0,2939	0,0009964	95,1	0,2937
30	0,0009995	135,7	0,4331	0,0009991	136,6	0,4328
40	0,0010030	177,2	0,5678	0,0010026	178,1	0,5674
50	0,0010073	218,7	0,6984	0,0010068	219,6	0,6979
60	0,0010122	260,3	0,8251	0,0010118	261,1	0,8246
70	0,0010178	301,9	0,9483	0,0010174	302,7	0,9477
80	0,0010240	343,6	1,0680	0,0010235	344,4	1,0674
90	0,0010308	385,4	1,1847	0,0010303	386,2	1,1840
100	0,0010381	347,2	1,2984	0,0010376	428,0	1,2977
120	0,0010545	511,3	1,5179	0,0010540	512,0	1,5170
140	0,0010733	596,1	1,7281	0,0010727	596,7	1,7271
160	0,0010947	681,6	1,9304	0,0010940	682,2	1,9292
180	0,0011191	768,3	2,1259	0,0011183	768,8	2,1246
200	0,0011470	856,4	2,3161	0,0011461	756,8	2,3146
250	0,0012389	1085,9	2,7771	0,0012373	1086,0	2,7748
300	<u>0,0013936</u>	<u>1342,6</u>	<u>3,2450</u>	<u>0,0013895</u>	<u>1341,5</u>	<u>3,2407</u>
350	0,01961	2888,1	5,8547	0,01721	2848,4	5,7615
400	0,02351	3076,4	6,1460	0,02108	3053,3	6,0787
450	0,02667	3226,2	6,3609	0,02411	3209,9	6,3332
500	0,02951	3361,6	6,5420	0,02679	3349,0	6,4893
600	0,03467	3615,5	6,8511	0,03161	3607,0	6,8034

Продолжение табл. П.3

Температура $t, ^\circ\text{C}$	$p = 13,00 \text{ МПа}$			$p = 14,00 \text{ МПа}$		
	$t_S = 330,81 ^\circ\text{C},$ $\nu' = 0,0015670 \text{ м}^3/\text{кг}; \nu'' = 0,01277 \text{ м}^3/\text{кг};$ $h' = 1533,0 \text{ кДж/кг}; h'' = 2662,4 \text{ кДж/кг};$ $s' = 3,5633 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}; s'' = 5,4333 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$			$t_S = 336,63 ^\circ\text{C},$ $\nu' = 0,0016104 \text{ м}^3/\text{кг}; \nu'' = 0,01149 \text{ м}^3/\text{кг};$ $h' = 1572,8 \text{ кДж/кг}; h'' = 2638,3 \text{ кДж/кг};$ $s' = 3,6262 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}; s'' = 5,3737 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$		
	$\nu, \text{ м}^3/\text{кг}$	$h, \text{ кДж/кг}$	$s, \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$	$\nu, \text{ м}^3/\text{кг}$	$h, \text{ кДж/кг}$	$s, \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$
0	0,0009938	13,1	0,0006	0,0009933	14,1	0,0007
10	0,0009942	54,6	0,1497	0,0009938	55,6	0,1496
20	0,0009959	96,0	0,2935	0,0009955	97,0	0,2933
30	0,0009986	137,4	0,4325	0,0009982	138,4	0,4322
40	0,0010021	178,9	0,5670	0,0010017	179,8	0,5666
50	0,0010064	220,4	0,6975	0,0010060	221,3	0,6970
60	0,0010113	262,0	0,8241	0,0010109	262,8	0,8236
70	0,0010169	303,6	0,9471	0,0010164	304,4	0,9465
80	0,0010231	345,2	1,0668	0,0010226	346,0	1,0661
90	0,0010298	386,9	1,1833	0,0010293	387,7	1,1826
100	0,0010371	428,8	1,2969	0,0010366	429,5	1,2961
120	0,0010534	512,8	1,5162	0,0010529	513,5	1,5153
140	0,0010721	597,4	1,7261	0,0010715	598,0	1,7251
160	0,0010933	682,8	1,9281	0,0010926	683,4	1,9269
180	0,0011175	769,4	2,1233	0,0011167	769,9	2,1220
200	0,0011451	857,2	2,3131	0,0011442	857,7	2,3117
250	0,0012356	1086,1	2,7726	0,0012340	1086,1	2,7704
300	<u>0,0013855</u>	<u>1340,5</u>	<u>3,2365</u>	<u>0,0013816</u>	<u>1339,5</u>	<u>3,2324</u>
350	0,01511	2804,0	5,6644	0,01323	2753,5	5,5606
400	0,01901	3029,3	6,0132	0,01722	3004,0	5,9488
450	0,02194	3193,1	6,2482	0,02007	3175,8	6,1953
500	0,02448	3336,1	6,4395	0,02251	3323,0	6,3922
600	0,02903	3598,4	6,7590	0,02681	3589,8	6,7172

Продолжение табл. П.3

Температура $t, ^\circ\text{C}$	$p = 15,00 \text{ МПа}$			$p = 16,00 \text{ МПа}$		
	$t_S = 342,12 ^\circ\text{C},$ $\nu' = 0,0016580 \text{ м}^3/\text{кг}; \nu'' = 0,01035 \text{ м}^3/\text{кг};$ $h' = 1612,2 \text{ кДж/кг}; h'' = 2611,6 \text{ кДж/кг};$ $s' = 3,6877 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}; s'' = 5,3132 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$			$t_S = 347,32 ^\circ\text{C},$ $\nu' = 0,0017101 \text{ м}^3/\text{кг}; \nu'' = 0,009330 \text{ м}^3/\text{кг};$ $h' = 1651,5 \text{ кДж/кг}; h'' = 2582,7 \text{ кДж/кг};$ $s' = 3,7486 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}; s'' = 5,2496 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$		
	$\nu, \text{ м}^3/\text{кг}$	$h, \text{ кДж/кг}$	$s, \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$	$\nu, \text{ м}^3/\text{кг}$	$h, \text{ кДж/кг}$	$s, \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$
0	0,0009928	15,1	0,0007	0,0009924	16,1	0,0008
10	0,0009933	56,5	0,1495	0,0009928	57,5	0,1494
20	0,0009950	97,9	0,2930	0,0009946	98,8	0,2928
30	0,0009978	139,3	0,4318	0,0009973	140,2	0,4315
40	0,0010013	180,7	0,5662	0,0010008	181,6	0,5659
50	0,0010055	222,1	0,6966	0,0010051	223,0	0,6961
60	0,0010105	263,6	0,8230	0,0010100	264,5	0,8225
70	0,0010160	305,2	0,9459	0,0010156	306,0	0,9453
80	0,0010221	346,8	1,0655	0,0010217	347,6	1,0648
90	0,0010289	388,5	1,1819	0,0010284	389,3	1,1812
100	0,0010361	430,3	1,2954	0,0010356	431,0	1,2946
120	0,0010523	514,2	1,5144	0,0010518	514,9	1,5136
140	0,0010709	598,7	1,7241	0,0010703	599,4	1,7231
160	0,0010919	684,0	1,9258	0,0010912	684,6	1,9247
180	0,0011159	770,4	2,1208	0,0011151	771,0	2,1195
200	0,0011432	858,1	2,3102	0,0011423	858,6	2,3087
250	0,0012324	1086,2	2,7682	0,0012308	1086,3	2,7660
300	<u>0,0013779</u>	<u>1338,6</u>	<u>3,2384</u>	<u>0,0013742</u>	<u>1337,7</u>	<u>3,2245</u>
350	0,01148	2693,8	5,4450	0,009782	2618,5	5,3071
400	0,01566	2977,6	5,8851	0,01427	2949,7	5,8215
450	0,01845	3158,2	6,1443	0,01702	3140,0	6,0947
500	0,02079	3309,7	6,3471	0,01929	3296,3	6,3038
600	0,02489	3580,2	6,6776	0,02321	3572,4	6,6401

Продолжение табл. П.3

Температура $t, ^\circ\text{C}$	$p = 17,00 \text{ МПа}$			$p = 18,00 \text{ МПа}$		
	$t_S = 352,26 ^\circ\text{C},$ $v' = 0,0017690 \text{ м}^3/\text{кг}; v'' = 0,008401 \text{ м}^3/\text{кг};$ $h' = 1691,6 \text{ кДж/кг}; h'' = 2550,8 \text{ кДж/кг};$ $s' = 3,8103 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}; s'' = 5,1841 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$			$t_S = 356,96 ^\circ\text{C},$ $v' = 0,0018380 \text{ м}^3/\text{кг}; v'' = 0,007534 \text{ м}^3/\text{кг};$ $h' = 1733,4 \text{ кДж/кг}; h'' = 2514,4 \text{ кДж/кг};$ $s' = 3,8739 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}; s'' = 5,1135 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$		
	$v, \text{ м}^3/\text{кг}$	$h, \text{ кДж/кг}$	$s, \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$	$v, \text{ м}^3/\text{кг}$	$h, \text{ кДж/кг}$	$s, \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$
0	0,0009919	17,1	0,0008	0,0009914	18,1	0,0008
10	0,0009924	58,4	0,1493	0,0009919	59,4	0,1491
20	0,0009942	99,7	0,2926	0,0009937	100,7	0,2924
30	0,0009969	141,1	0,4312	0,0009965	142,0	0,4309
40	0,0010004	182,4	0,5655	0,0010000	183,3	0,5651
50	0,0010047	223,8	0,6956	0,0010043	224,7	0,6952
60	0,0010096	265,3	0,8220	0,0010092	266,1	0,8215
70	0,0010151	306,8	0,9448	0,0010147	307,6	0,9442
80	0,0010212	348,4	1,0642	0,0010208	349,2	3,0636
90	0,0010279	390,0	1,1805	0,0010274	390,8	1,1798
100	0,0010351	431,8	1,2939	0,0010346	432,5	1,2931
120	0,0010512	515,6	1,5127	0,0010507	516,3	1,5118
140	0,0010697	600,0	1,7222	0,0010691	600,7	1,7212
160	0,0010906	685,2	1,9236	0,0010899	685,9	1,9225
180	0,0011143	771,5	2,1182	0,0011136	772,0	2,1170
200	0,0011414	859,0	2,3073	0,0011405	859,5	2,3058
250	0,0012393	1086,4	2,7639	0,0012377	1086,5	2,7617
300	0,0013607	1336,9	3,2206	0,0013672	1336,1	3,2168
350	<u>0,001728</u>	<u>1668,7</u>	<u>3,7636</u>	<u>0,001704</u>	<u>1660,9</u>	<u>3,7582</u>
400	0,01303	2920,2	5,7575	0,01191	2889,0	5,6926
450	0,01576	3121,4	6,0463	0,01463	3102,3	5,9989
500	0,01797	3282,6	6,2620	0,01678	3268,7	6,2215
600	0,02173	3563,6	6,6043	0,02041	3554,8	6,5701

Продолжение табл. П.3

Температура $t, ^\circ\text{C}$	$p = 19,00 \text{ МПа}$			$p = 20,00 \text{ МПа}$		
	$t_S = 361,44 ^\circ\text{C},$ $\nu' = 0,0019231 \text{ м}^3/\text{кг}; \nu'' = 0,006700 \text{ м}^3/\text{кг};$ $h' = 1778,2 \text{ кДж/кг}; h'' = 2470,1 \text{ кДж/кг};$ $s' = 3,9417 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}; s'' = 5,0321 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$			$t_S = 365,71 ^\circ\text{C},$ $\nu' = 0,002038 \text{ м}^3/\text{кг}; \nu'' = 0,005873 \text{ м}^3/\text{кг};$ $h' = 1828,8 \text{ кДж/кг}; h'' = 2340,2 \text{ кДж/кг};$ $s' = 4,0181 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}; s'' = 4,9338 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$		
	$\nu, \text{ м}^3/\text{кг}$	$h, \text{ кДж/кг}$	$s, \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$	$\nu, \text{ м}^3/\text{кг}$	$h, \text{ кДж/кг}$	$s, \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$
0	0,0009909	19,1	0,0008	0,0009904	20,1	0,0008
10	0,0009915	60,4	0,1490	0,0009910	61,3	0,1489
20	0,0009933	101,6	0,2921	0,0009929	102,5	0,2919
30	0,0009960	142,9	0,4306	0,0009956	143,8	0,4303
40	0,0009996	184,2	0,5647	0,0009992	185,1	0,5643
50	0,0010038	225,6	0,6947	0,0010034	226,4	0,6943
60	0,0010087	267,0	0,8209	0,0010083	267,8	0,8204
70	0,0010142	308,4	0,9436	0,0010138	309,3	0,9430
80	0,0010203	350,0	1,0629	0,0010199	350,8	1,0623
90	0,0010270	391,6	1,1791	0,0010265	392,4	1,1784
100	0,0010342	433,3	1,2924	0,0010337	434,0	1,2916
120	0,0010502	517,0	1,5110	0,0010496	517,7	1,5101
140	0,0010685	601,4	1,7202	0,0010679	602,0	1,7192
160	0,0010892	686,5	1,9214	0,0010886	687,1	1,9203
180	0,0011128	772,6	2,1157	0,0011120	773,1	2,1145
200	0,0011396	860,0	2,3044	0,0011387	860,4	2,3030
250	0,0012362	1086,7	2,7596	0,0012247	1086,8	2,7575
300	0,0013639	1335,3	3,2131	0,0013606	1334,6	3,2095
350	<u>0,001683</u>	<u>1654,2</u>	<u>3,7448</u>	<u>0,001666</u>	<u>1648,4</u>	<u>3,7327</u>
400	0,01089	2855,7	5,6262	0,009952	2820,1	5,5578
450	0,01362	3082,6	5,9522	0,01270	3062,4	5,9061
500	0,01573	3254,5	6,1822	0,01477	3240,2	6,1440
600	0,01923	3545,9	6,5372	0,01816	3536,9	6,5055

Температура $t, ^\circ\text{C}$	$p = 21,00 \text{ МПа}$			$p = 22,00 \text{ МПа}$		
	$t_S = 369,79 ^\circ\text{C},$ $\nu' = 0,002218 \text{ м}^3/\text{кг}; \nu'' = 0,005006 \text{ м}^3/\text{кг};$ $h' = 1892,2 \text{ кДж/кг}; h'' = 2340,2 \text{ кДж/кг};$ $s' = 4,1137 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}; s'' = 4,8106 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$			$t_S = 376,80 ^\circ\text{C},$ $\nu' = 0,002675 \text{ м}^3/\text{кг}; \nu'' = 0,003757 \text{ м}^3/\text{кг};$ $h' = 2007,7 \text{ кДж/кг}; h'' = 2192,5 \text{ кДж/кг};$ $s' = 4,2891 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}; s'' = 4,5748 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$		
	$\nu, \text{ м}^3/\text{кг}$	$h, \text{ кДж/кг}$	$s, \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$	$\nu, \text{ м}^3/\text{кг}$	$h, \text{ кДж/кг}$	$s, \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$
0	0,0009900	21,1	0,0008	0,0009895	22,1	0,0009
10	0,0009906	62,3	0,1488	0,0009901	63,2	0,1436
20	0,0009924	103,4	0,2917	0,0009920	104,4	0,2914
30	0,0009952	144,7	0,4300	0,0009948	145,6	0,4296
40	0,0009988	185,9	0,5639	0,0009983	186,8	0,5635
50	0,0010030	227,3	0,6938	0,0010026	228,1	0,6934
60	0,0010079	268,6	0,8199	0,0010075	269,5	0,8194
70	0,0010134	310,1	0,9424	0,0010129	310,9	0,9419
80	0,0010194	351,6	1,0616	0,0010190	352,4	1,0610
90	0,0010260	393,1	1,1777	0,0010256	393,9	1,1770
100	0,0010332	434,8	1,2909	0,0010327	435,6	1,2902
120	0,0010491	518,5	1,5093	0,0010486	519,2	1,5084
140	0,0010673	602,7	1,7183	0,0010667	603,4	1,7173
160	0,0010879	687,7	1,9192	0,0010872	668,3	1,9181
180	0,0011112	773,7	2,1132	0,0011105	774,2	2,1120
200	0,0011378	860,9	2,3015	0,0011369	861,4	2,3001
250	0,0012232	1086,9	2,7554	0,0012218	1087,1	2,7534
300	0,0013574	1333,9	3,2059	0,0013542	1333,3	3,2024
350	<u>0,0016650</u>	<u>1643,1</u>	<u>3,7217</u>	<u>0,0016636</u>	<u>1638,4</u>	<u>3,7114</u>
400	0,009080	2781,6	5,4865	0,008262	2739,7	5,4114
450	0,01187	3041,7	5,8603	0,01111	3020,3	5,8149
500	0,01391	3225,6	6,1066	0,01312	3210,8	6,0700
600	0,01720	3527,9	6,4749	0,01633	3518,8	6,4453



*Учебное издание*

Галдин Владимир Дмитриевич

ГЕНЕРАТОРЫ ТЕПЛОТЫ

Учебно-методическое пособие

\* \* \*

Редактор Т.И. Калинина

\* \* \*

Подписано к печати  
Формат 60 x 90 1/16. Бумага писчая  
Оперативный способ печати  
Гарнитура Таймс  
Усл. п.л. , уч.-изд. л.  
Тираж 80 экз. Заказ  
Цена договорная

\* \* \*

Издательство СибАДИ  
644099, Омск, ул. П. Некрасова, 10

-----  
Отпечатано в подразделении ОП издательства СибАДИ