

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**  
**УНИВЕРСИТЕТ ИТМО**

**В.В. Митропов**

**РАСЧЕТ И СОПОСТАВЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ  
ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ  
ДЛЯ ИДЕАЛЬНОГО И РЕАЛЬНЫХ  
РАБОЧИХ ТЕЛ**

**Учебно-методическое пособие**

 **УНИВЕРСИТЕТ ИТМО**

**Санкт-Петербург**

**2016**

УДК 621.564

**Митропов В.В.** Расчет и сопоставление основных термодинамических процессов для идеального и реальных рабочих тел: Учеб.-метод. пособие. – СПб.: Университет ИТМО, 2016. – 49 с.

Содержит задания, теоретические сведения, описание метода, хода выполнения и отчета о проделанной работе.

Предназначен для бакалавров направлений: 14.03.01 по дисциплине «Термодинамика»; 15.03.04, 16.03.03, 23.03.03 – «Основы термодинамики и теплопередачи»; 15.03.02 – «Термодинамика и теплообмен»; 19.03.01 – «Основы термодинамики и теплопереноса»; 19.03.02, 19.03.03 – «Теоретические основы тепло- и хладотехники»; 18.03.02 – «Основы тепло- и хладотехники» очной и заочной форм обучения.

**Рецензент: кандидат техн. наук, проф. А.А. Малышев**

**Рекомендовано к печати Советом факультета холодильной, криогенной техники и кондиционирования, протокол № 2 от 30.10.2016 г.**



**Университет ИТМО** – ведущий вуз России в области информационных и фотонных технологий, один из немногих российских вузов, получивших в 2009 году статус национального исследовательского университета. С 2013 года Университет ИТМО – участник программы повышения конкурентоспособности российских университетов среди ведущих мировых научно-образовательных центров, известной как проект «5 – 100». Цель Университета ИТМО – становление исследовательского университета мирового уровня, предпринимательского по типу, ориентированного на интернационализацию всех направлений деятельности.

© Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, 2016

© Митропов В.В., 2016

## СПИСОК ОСНОВНЫХ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

$V$	– объем, $\text{м}^3$ , или объемный расход, $\text{м}^3/\text{с}$
$v$	– удельный объем, $\text{м}^3/\text{кг}$
$M$	– масса, кг, или массовый расход, $\text{кг}/\text{с}$
$p$	– давление, Па, МПа
$B$	– атмосферное давление, гПа, мм рт. ст.
$p_{\text{абс}}$	– абсолютное давление, Па
$\rho$	– плотность, $\text{кг}/\text{м}^3$
$T$	– температура по шкале Кельвина, К
$t$	– температура по шкале Цельсия, $^{\circ}\text{C}$
$R$	– удельная газовая постоянная, $\text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$
$Q, q$	– теплота, кДж, кДж/кг
$U, u$	– внутренняя энергия, кДж, кДж/кг
$L, l$	– работа, кДж, кДж/кг
$H, h$	– энтальпия, кДж/кг
$S, s$	– энтропия, $\text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$
$h', u', s'$	– энтальпия, внутренняя энергия и энтропия насыщенной жидкости, $\text{кДж}/\text{кг}$ , $\text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$
$h'', u'', s''$	– энтальпия, внутренняя энергия и энтропия сухого насыщенного пара, $\text{кДж}/\text{кг}$ , $\text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$
$x$	– степень сухости пара
$r$	– удельная теплота парообразования, $\text{кДж}/\text{кг}$
$c$	– удельная массовая теплоемкость, $\text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$
$k$	– показатель адиабаты
$n$	– показатель политропы
$N$	– мощность, Вт, кВт
$\varepsilon$	– холодильный коэффициент цикла
$\mu$	– отопительный коэффициент цикла
$z$	– коэффициент сжимаемости
$a$	– скорость звука, $\text{м}/\text{с}$
$f$	– площадь, $\text{м}^2$

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Известно, что обратимый цикл Карно обладает максимально возможной эффективностью в сравнении с любым другим циклом, осуществляемым в том же интервале температур источников.

Для реализации изотермических процессов подвода и отвода теплоты в цикле реальной холодильной машины используются процессы кипения и конденсации рабочего тела. Таким образом, рабочее вещество в цикле паровой холодильной машины изменяет свое агрегатное состояние, а сам цикл располагается в области параметров состояния, включающей область влажного пара. Поэтому в качестве рабочих тел холодильных машин используются вещества, имеющие критическую температуру более высокую, чем температура окружающей среды, например аммиак.

Давления, при которых совершается цикл паровой холодильной машины, лежат обычно в интервале от 0,1 до 0,3 МПа. При указанных ранее давлениях термодинамические свойства хладагентов значительно отличаются от свойств идеального газа.

В циклах глубокого охлаждения так же, как и в цикле паровой холодильной машины, ряд процессов происходит в области газообразного состояния рабочего тела. Но и здесь вещество может находиться в состояниях, существенно отличающихся от идеального газа. Например, в цикле Линде дросселирование сжатого воздуха приводит к понижению его температуры, что используется для ожижения воздуха. Напротив, дросселирование идеального газа, как известно, не изменяет его температуры.

В связи с вышеизложенным понятна важность для будущего инженера подробного ознакомления с процессами реальных газов, сравнения этих процессов с процессами идеальных газов. Именно эту цель и преследует настоящее издание.

## ИДЕАЛЬНЫЙ ГАЗ

Под **идеальным газом** понимают такой воображаемый газ, между молекулами которого не действуют силы взаимного притяжения, а объем, занимаемый молекулами, исчезающе мал по сравнению с объемом межмолекулярного пространства, т. е. молекулы рассматриваются как материальные точки. Все газообразные вещества, в том числе и хладагенты, при исчезающе малых давлениях полностью подчиняются законам и уравнениям идеального газа.

### Параметры термодинамического состояния тела

**Удельный объем** ( $v$ ) – это объем единицы массы данного вещества [ $\text{м}^3/\text{кг}$ ]

$$v = \frac{V}{m},$$

где  $V$  – объем,  $\text{м}^3$ ;  $m$  – масса,  $\text{кг}$ .

**Плотность** ( $\rho$ ) – это масса единицы объема вещества [ $\text{кг}/\text{м}^3$ ]:

$$\rho = \frac{1}{v} = \frac{m}{V}.$$

**Давление** ( $p$ ) – это сила воздействия вещества на ограничивающую его поверхность, отнесенная к единице этой поверхности [ $\text{Па} = \text{Н}/\text{м}^2$ ]. Термодинамическим параметром состояния является только *абсолютное давление*. Под ним понимают давление, отсчитываемое от нуля.

*Абсолютное давление* выше атмосферного определяется как

$$P_{\text{абс}} = P_{\text{бар}} + P_{\text{изб}},$$

*абсолютное давление* ниже атмосферного –

$$P_{\text{абс}} = P_{\text{бар}} - P_{\text{вак}},$$

где  $p_{\text{изб}}$  – избыточное (или манометрическое) давление;  $p_{\text{вак}}$  – показание вакуумметра (вакуум или разрежение);  $p_{\text{бар}}$  – атмосферное (или барометрическое) давление.

Соотношение между различными единицами давления:

$$1 \text{ Па} = 10^{-5} \text{ бар} = 7,502 \cdot 10^{-3} \text{ мм рт.ст.} = 0,102 \text{ мм вод.ст.}$$

При измерении давления ртутными приборами их показания необходимо приводить к  $0^\circ\text{C}$ :

$$p_0 = p (1 - 0,000172t) ,$$

где  $p_0$  – показание прибора, приведенное, к  $0^\circ\text{C}$ , мм рт.ст.;  $p$  – действительная высота ртутного столба при температуре воздуха  $t$ ,  $^\circ\text{C}$ ; 0,000172 – коэффициент объемного расширения ртути.

**Температура** ( $t$ ,  $T$ ) – это мера нагретости тела. Температуру можно рассматривать как параметр, одинаковый у частей термодинамической системы, находящихся в состоянии термического равновесия. По действующему стандарту приняты две температурные шкалы – термодинамическая и международная температурная шкала. Отсчеты по каждой из этих шкал можно выразить либо в кельвинах ( $T$ , [К]), либо в градусах Цельсия ( $t$ ,  $^\circ\text{C}$ ). Соотношение между температурами, выраженными в кельвинах и градусах Цельсия, имеет вид

$$T = t + 273,15 .$$

В некоторых странах для измерения температуры применяют шкалу Фаренгейта. Для перевода показаний этой шкалы в градусы Цельсия и обратно служит соотношение

$$t \text{ } ^\circ\text{C} = \frac{5}{9} t \text{ } ^\circ\text{F} - 32 .$$

**Энтальпия.** В термодинамике во многих случаях применяется не внутренняя энергия, а другой параметр – энтальпия, которая представляет собой

$$h = u + pv ,$$

где  $pv$  – потенциальная энергия давления, представляет собой работу, которую надо затратить, чтобы ввести рассматриваемое тело с объемом  $v$  в среду, имеющую давление  $p$ .

Каждая величина, входящая в выражение энтальпии, – параметр состояния, значит, энтальпия – параметр состояния и  $dh$  – полный дифференциал. (Полным называется дифференциал, интеграл которого не зависит от пути интегрирования, а определяется только начальным и конечным пределами интегрирования.):

$$\int_1^2 dh = \int_1^2 c_p dt;$$

$$\Delta h = c_{pm} t_2 - t_1 .$$

Принято считать  $h = 0$  при  $t = 0$  (или  $T = 0$ ), тогда

$$h = c_p \Big|_0^t t.$$

Из сказанного вытекает и другое определение энтальпии.

Энтальпия – это количество тепла, которое нужно подвести к телу в изобарном процессе, чтобы перевести его из начального состояния в данное.

**Энтропия** так же, как и энтальпия, является параметром состояния.

Из I закона  $dq = c_v dT + p dv$ .

Поделим обе части на  $T$ :

$$\frac{dq}{T} = \frac{c_v}{T} dT + \frac{p}{T} dv.$$

Обозначим  $\frac{dq}{T} = ds$ , где под  $s$  подразумеваем параметр состояния – энтропию.

Энтропия есть мера необратимости протекания термодинамических процессов.

# ПРОЦЕССЫ ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА

## Изохорный процесс

Процесс, происходящий без изменения объема, называется изохорным ( $v = \text{const}$ ).

Уравнение процесса

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{T_1}{T_2}.$$

Изменение внутренней энергии

$$\Delta u = u_2 - u_1 = c_{vm} T_2 - T_1.$$

Внешняя работа газа

$$dl = 0, \quad l = 0.$$

Количество теплоты, сообщаемое газу или отнимаемое в процессе:

$$q = \Delta u = c_{vm} T_2 - T_1$$

Теплоемкость процесса:  $c = c_v$ .

Изменение энтропии в процессе

$$\Delta s = s_2 - s_1 = \int_1^2 \frac{dq}{T} = \int_1^2 \frac{c_v dT}{T} = c_{vm} \ln \left( \frac{T_2}{T_1} \right).$$

Изображение процесса в рабочей (а) и тепловой (б) диаграммах (рис. 1).



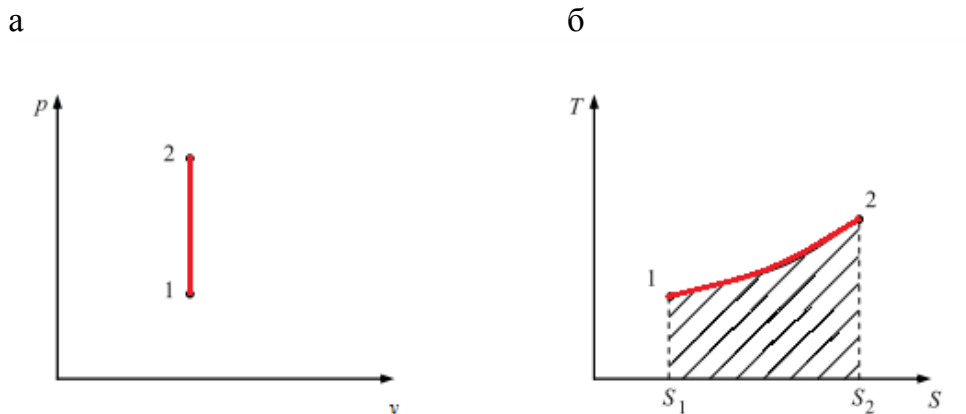


Рис. 1. Изохорный процесс

### Изобарный процесс

Процесс, происходящий при постоянном давлении, называется изобарным ( $p = \text{const}$ ).

Уравнение процесса

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{T_1}{T_2}.$$

Изменение внутренней энергии

$$\Delta u = u_2 - u_1 = c_{vm} T_2 - T_1 .$$

Внешняя работа газа

$$dl = p dv, \quad l = \int_1^2 p dv = p \int_1^2 dv = p v_2 - v_1 \quad \text{или} \quad l = R T_2 - T_1 .$$

Количество теплоты, сообщаемое газу или отнимаемое в процессе,

$$dq = c_p dT, \quad q = c_{pm} T_2 - T_1 .$$

Теплоемкость процесса:  $c = c_p$ .

Изменение энтропии в процессе

$$\Delta s = s_2 - s_1 = \int_1^2 \frac{dq}{T} = \int_1^2 \frac{c_p dT}{T} = c_{pm} \ln \left( \frac{T_2}{T_1} \right).$$

Изображение процесса в рабочей (а) и тепловой (б) диаграммах (рис. 2).

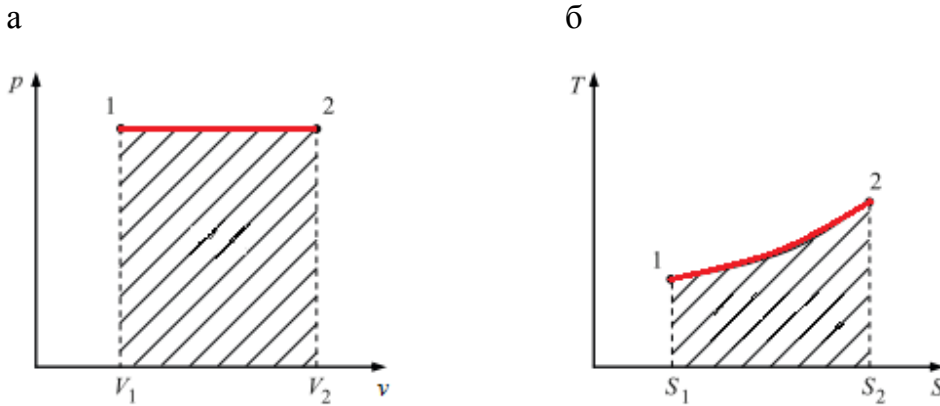


Рис. 2. Изобарный процесс

### Изотермический процесс

Процесс, происходящий при постоянной температуре, называется изотермическим ( $T = \text{const}$ ).

Уравнение процесса

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{v_2}{v_1}.$$

Изменение внутренней энергии

$$\Delta u = u_2 - u_1 = c_{vm} \Delta T = 0, \quad \Delta T = 0.$$

Внешняя работа газа

$$dl = p dv, \quad l = \frac{RT}{v}, \quad dl = RT \frac{dv}{v},$$

$$l = \int_1^2 RT \frac{dv}{v} = RT \ln \left( \frac{v_2}{v_1} \right) \text{ или } l = RT \ln \left( \frac{v_2}{v_1} \right) = RT \ln \left( \frac{p_1}{p_2} \right).$$

Количество теплоты, сообщаемое газу или отнимаемое в процессе,

$$q = \Delta u + l \quad \Delta u = 0, \quad q = l.$$

Все подведенное тепло превращается в работу

$$q = l = T \cdot (s_2 - s_1).$$

Теплоемкость процесса:  $c = \frac{dq}{dT}$ ,  $dT = 0$ ,  $c = \infty$ .

Изменение энтропии в процессе:

$$\Delta s = s_2 - s_1 = \int_1^2 \frac{dq}{T} = \frac{1}{T} \int_1^2 dq = \frac{q}{T};$$

$$\Delta s = s_2 - s_1 = R \ln \left( \frac{v_2}{v_1} \right) = R \ln \left( \frac{p_1}{p_2} \right).$$

Изображение процесса в рабочей (а) и тепловой (б) диаграммах (рис. 3).

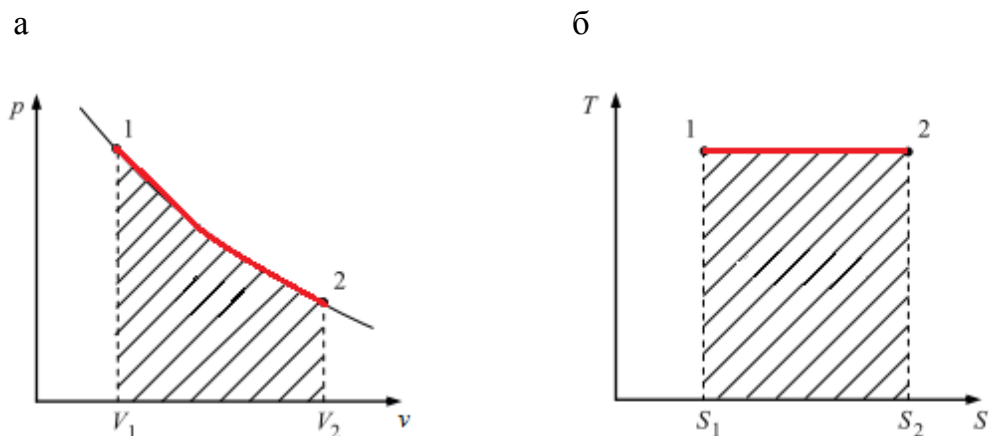


Рис. 3. Изотермический процесс

## Адиабатный процесс

Процесс, происходящий без теплообмена между газом и окружающей средой, называется адиабатным ( $p v^k = \text{const}$ ).

Уравнения процесса:

$$\frac{p_1}{p_2} = \left( \frac{v_2}{v_1} \right)^k ; \quad \frac{T_1}{T_2} = \left( \frac{v_2}{v_1} \right)^{k-1} ; \quad \frac{T_1}{T_2} = \left( \frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{k-1}{k}} .$$

Изменение внутренней энергии

$$\Delta u = c_{vm} T_2 - T_1 .$$

Внешняя работа газа

$$l = \frac{1}{k-1} p_1 v_1 - p_2 v_2 \quad \text{или} \quad l = \frac{R}{k-1} T_1 - T_2 .$$

Количество теплоты, сообщаемое газу или отнимаемое в процессе,

$$dq = 0 .$$

Теплоемкость процесса:  $c = 0$ .

Изменение энтропии в процессе

$$ds = \frac{dq}{T} = 0, \quad s = \text{const} .$$

Изображение процесса в рабочей (а) и тепловой (б) диаграммах (рис. 4).

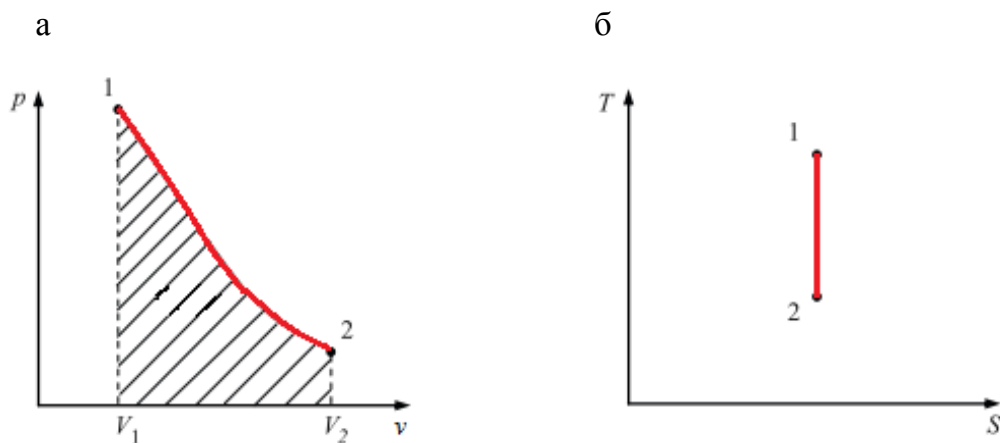


Рис. 4. Адиабатный процесс

### Политропный процесс

Политропным называется всякий термодинамический процесс, в котором превращение энергии осуществляется согласно определенному закону ( $pv^n = \text{const}$ ).

Все рассмотренные ранее процессы являются частными случаями политропного.

При некоторых определенных значениях  $n$  получаем известные нам процессы (табл. 1).

Таблица 1

Показатель политропы	Уравнение процесса		Название процесса
$n = 0$	$pv^0 = \text{const}$	$p \cdot 1 = \text{const}$	Изобарный
$n = \infty$	$p^n v = \text{const}$	$p^0 v = 1v = \text{const}$	Изохорный
$n = 1$	$pv^1 = \text{const}$		Изотермический
$n = k$	$pv^k = \text{const}$		Адиабатный

Уравнения процесса:

$$\frac{p_1}{p_2} = \left( \frac{v_2}{v_1} \right)^n ; \quad \frac{T_1}{T_2} = \left( \frac{v_2}{v_1} \right)^{n-1} ; \quad \frac{T_1}{T_2} = \left( \frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{n-1}{n}} .$$

Изменение внутренней энергии

$$\Delta u = c_v T_2 - T_1 .$$

Внешняя работа газа

$$l = \frac{1}{n-1} p_1 v_1 - p_2 v_2 ;$$

$$l = \frac{R}{n-1} T_1 - T_2 .$$

Теплоемкость процесса:  $c = c_v \frac{n-k}{n-1}$ .

Теплоемкость может принимать отрицательные значения, если  $1 < n < k$  ( $c < 0$ ).

Количество теплоты, сообщаемое газу или отнимаемое в процессе,

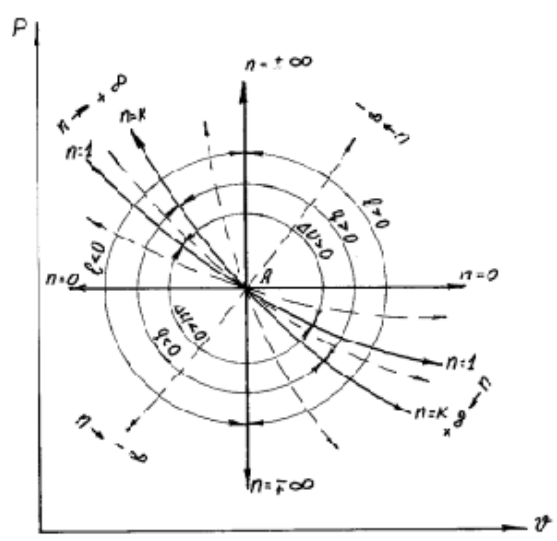
$$q = c_v \frac{n-k}{n-1} T_2 - T_1 .$$

Изменение энтропии в процессе

$$\Delta s = c_v \frac{n-k}{n-1} \ln \frac{T_2}{T_1} .$$

Изображение процесса в рабочей (а) и тепловой (б) диаграммах (рис. 5).

а



б

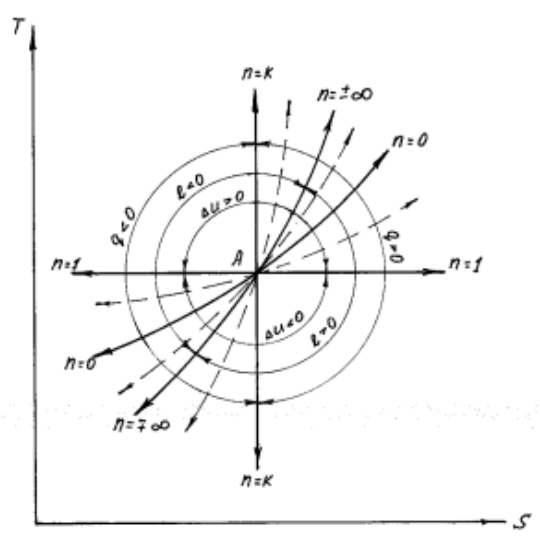


Рис. 5. Изображение политропных процессов

## РЕАЛЬНЫЙ ГАЗ

Все газообразные вещества, в том числе и хладагенты, при исчезающе малых давлениях полностью подчиняются законам и уравнениям идеального газа. По мере повышения давления рабочего тела и приближения к области насыщения происходит сближение молекул газа на расстояния, при которых силы межмолекулярного взаимодействия, а также объем, недоступный для свободного перемещения молекул, оказываются настолько значительными, что пренебрежение ими приводит к существенным погрешностям. Газ все больше отличается от идеального, молекулы его начинают объединяться (ассоциироваться) в комплексы, которые являются характерной чертой жидкого состояния вещества. На характер взаимодействия молекул реального газа оказывают влияние наличие у них дипольного момента и ряд других особенностей внутреннего строения.

Термическое уравнение состояния реального газа, т.е. зависимость между его давлением, температурой и плотностью, в статистически обобщенном виде отражает результаты взаимодействия огромного множества молекул газа.

Точные уравнения состояния реальных газов являются весьма сложными (они содержат до нескольких десятков констант). Выполнять непосредственно по ним расчеты термодинамических процессов без применения ЭВМ практически невозможно. Поэтому расчеты процессов реальных газов часто производят с помощью таблиц термодинамических свойств или диаграмм, которые составляются по уравнениям состояния.

### Основные признаки отклонения реального газа от идеального

*Первый* признак, по которому судят, насколько данный газ приближается к идеальному, это подчиняется ли газ уравнению состояния для идеального газа:

$$pv = RT \text{ для идеального газа, т. е. } \frac{pv}{RT} = 1;$$

$$\left( \frac{pv}{RT} = z - \text{коэффициент сжимаемости} \right).$$

Для идеальных газов  $z = 1$ . Для реальных газов  $z \neq 1$  и отклонение тем больше, чем выше давление.



При  $T = \text{const}$  знаменатель  $\frac{pv}{RT}$  постоянен (рис. 6). Для идеального газа справедлив закон Бойля–Мариотта: во сколько раз возрастает давление, во столько раз уменьшится объем. У водорода, например, объем уменьшается медленнее, чем растет давление, а у метана – наоборот.

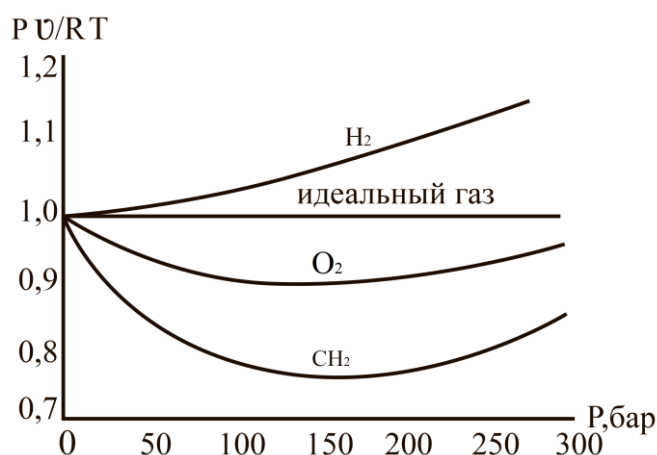


Рис. 6. Коэффициент сжимаемости для разных газов при  $T = \text{const}$

**Второе** отклонение реальных газов от идеальных состоит в том, что теплоемкость реальных газов зависит не только от температуры, но и от давления. Эти зависимости имеют сложный характер. При давлениях ниже критических  $c_p$  и  $c_v$  возрастают с понижением температуры и приближением к состоянию сжижения.

Идеальный газ:

$$c_p = f(T); \quad c_v = f(T); \quad c_p + c_v = R.$$

Реальный газ:

$$c = f(T, p); \quad c_p = c_{p_0} + \Delta c_p; \quad c_v = c_{v_\infty} + \Delta c_v,$$

где  $c_{p_0}$  и  $c_{v_\infty}$  – теплоемкость в идеальном газовом состоянии, т. е. при  $p \rightarrow 0$  или  $v \rightarrow \infty$ ;  $\Delta c_p$  и  $\Delta c_v$  – составляющие, учитывающие влияние давления.

При этом в области высоких температур влияние температуры оказывается незначительным. Повышение давления в этой области

приводит к увеличению теплоемкости. Это положение иллюстрируется рис. 7 для перегретого пара хладагента R22. Пунктиром показана линия насыщения.

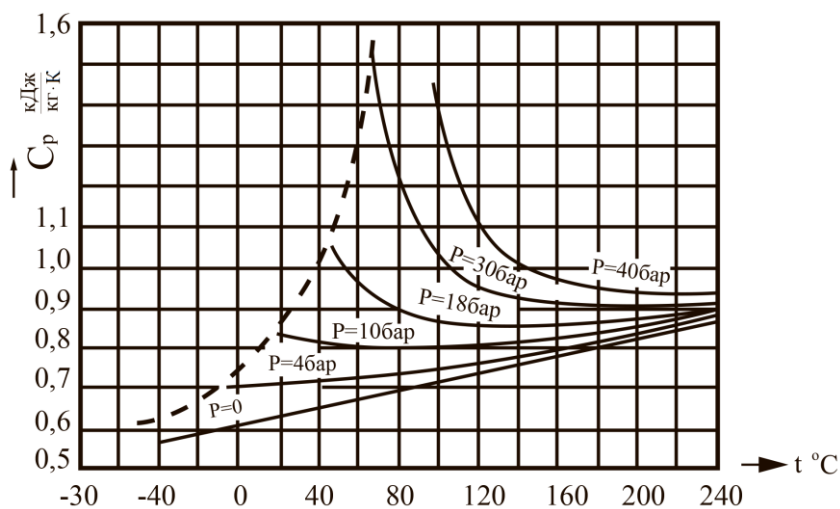


Рис. 7. Зависимость  $c_p = f(p, T)$  для хладагента R22

Оба рассмотренных отклонения носят *количественный* характер.

**Третье** отклонение реального газа от идеального носит *качественный* характер и заключается в том, что реальные газы могут претерпевать изменения агрегатного состояния. На рис. 8 нанесены изобарные процессы реального газа при различных давлениях.

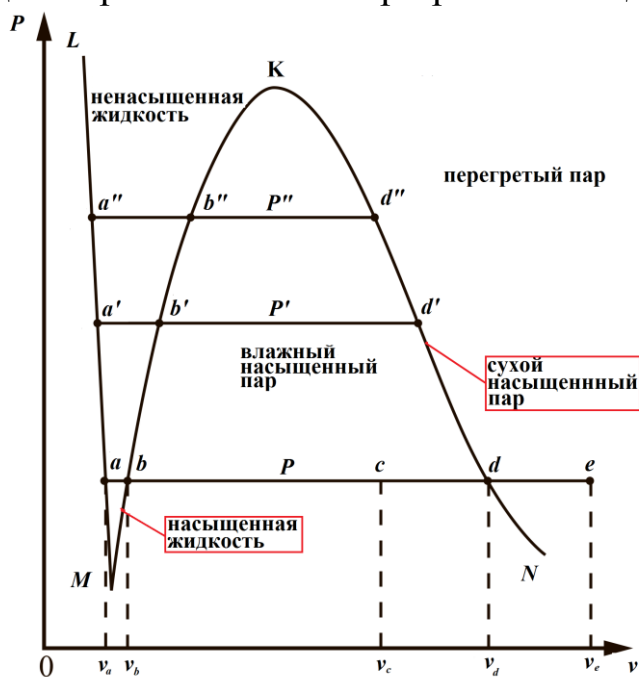


Рис. 8. Рабочая диаграмма для пара

## ТАБЛИЧНЫЕ ФОРМЫ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ХЛАДАГЕНТОВ

Таблицы термодинамических свойств холодильных агентов в газообразном и жидком состояниях можно разделить на два типа в зависимости от представляемой области параметров. Таблицы первого типа служат для описания двухфазной области, при этом в них приводятся значения свойств только для двух предельных состояний влажного пара – насыщенной жидкости (ее параметры отмечаются одним штрихом) и сухого насыщенного пара (его параметры отмечаются двумя штрихами). Значения свойств влажного пара, имеющего произвольную степень сухости, в таблицах не приводятся, а находятся расчетом по соответствующим формулам. Параметры рабочих тел в состоянии насыщения можно представить в зависимости от температуры или давления, однако для холодильных агентов используется в качестве аргумента почти исключительно температура. Шаг по температуре обычно принимается равным 1, 2, 5 или 10 °С. Иногда используется переменный шаг, при этом подробнее представляют наиболее важную для практики область температур. Для иллюстрации в табл. 2 приводится фрагмент таблицы термодинамических свойств хладагента R22 в состоянии насыщения.

Таблица 2

$t$ , °С	$p$ , МПа	$\rho'$ , кг/м <sup>3</sup>	$\rho''$ , кг/м <sup>3</sup>	$h'$ , кДж/кг	$h''$ , кДж/кг	$s'$ , кДж/(кг·К)	$s''$ , кДж/(кг·К)
0	0,4981	1282	21,28	500,00	704,43	1,0000	1,7484
10	0,6809	1248	28,87	511,83	707,93	1,0420	1,7346
20	0,9097	1211	38,53	523,93	711,04	1,0894	1,7216
30	1,1913	1172	50,76	536,40	713,67	1,1244	1,7091
40	1,5327	1130	66,25	549,30	715,69	1,1653	1,6966
50	1,9418	1083	86,02	562,85	716,93	1,2067	1,6835

Таблицы второго типа служат для описания однофазной области состояний. В одной из распространенных форм этих таблиц свойства рабочего тела представлены на изотермах при целочисленных, или «круглых», значениях давлений.

Однако для холодильных агентов указанный выше способ компоновки таблиц не является оптимальным. Дело в том, что при расчете хо-

лодильного цикла, как правило, задаются температуры кипения и конденсации рабочего тела, а они не соответствуют «круглым» значениям давления насыщения. Поэтому табулирование свойств делают при давлениях, соответствующих целочисленным значениям температур насыщения. Для иллюстрации в табл. 3 приводятся термодинамические свойства перегретых паров хладагента R13 в однофазной области.

Таблица 3

$t, \text{ } ^\circ\text{C}$	$v \cdot 10^3, \text{ м}^3/\text{кг}$	$h, \text{ кДж/кг}$	$s, \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$	$v \cdot 10^3, \text{ м}^3/\text{кг}$	$h, \text{ кДж/кг}$	$s, \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$
	$t_{\text{н}} = -60 \text{ } ^\circ\text{C} \text{ (} p = 0,281 \text{ МПа)}$			$t_{\text{н}} = -55 \text{ } ^\circ\text{C} \text{ (} p = 0,345 \text{ МПа)}$		
-60	0,05530	474,95	4,3933	–	–	–
-55	0,05704	477,96	4,4073	0,04549	476,80	4,3870
-50	0,05874	480,98	4,4209	0,04694	479,90	4,4011
-45	0,6041	483,99	4,4343	0,04836	483,00	4,4148
-40	0,6206	487,02	4,4474	0,04976	486,09	4,4282
	$t_{\text{н}} = -50 \text{ } ^\circ\text{C} \text{ (} p = 0,4193 \text{ МПа)}$			$t_{\text{н}} = -45 \text{ } ^\circ\text{C} \text{ (} p = 0,5049 \text{ МПа)}$		
-50	0,03772	478,60	4,3812	–	–	–
-45	0,03895	481,79	4,3954	0,03150	480,33	4,3759
-40	0,04016	484,97	4,4092	0,03256	483,63	4,3902
-35	0,04133	488,15	4,4227	0,03360	486,90	4,4040
-30	0,04249	491,32	4,4358	0,03460	490,16	4,4176
-25	0,04363	494,49	4,4488	0,03559	493,41	4,4308
-20	0,04475	497,68	4,4615	0,03656	496,66	4,4438

## ДИАГРАММЫ ХОЛОДИЛЬНЫХ АГЕНТОВ

Более наглядны и компактно содержат информацию о свойствах вещества в любом фазовом состоянии диаграммы.

На диаграммах в масштабе строятся нижняя и верхняя пограничные кривые и наносится сетка изобар, изохор, изотерм, линий постоянных энтальпий, энтропий и паросодержания. Наибольшее распространение имеют диаграммы  $T-s$ ,  $h-s$  для водяного пара и диаграммы  $T-s$  и  $\lg p-h$  для холодильных агентов.

Одно из основных преимуществ диаграммы  $\lg p-h$  перед тепловой состоит в том, что теплота подогрева жидкости, парообразования, перегрева пара изображается в ней не площадями, а отрезками. Представление разности энтальпий в виде отрезков весьма удобно для расчета и анализа циклов различных машин. Пример диаграммы показан на рис. 9.

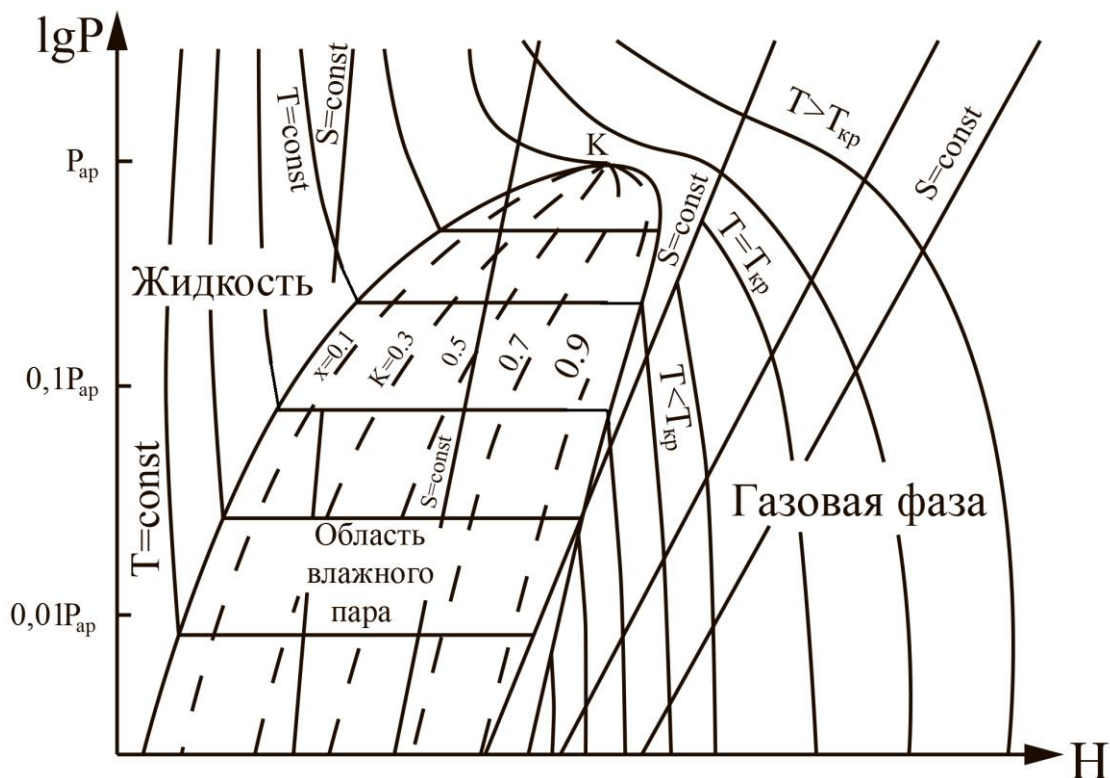


Рис. 9. Диаграмма  $\lg p-h$

## ПРОЦЕССЫ РЕАЛЬНОГО ГАЗА

### Изохорный процесс

Процесс, происходящий без изменения объема, называется изохорным ( $v = \text{const}$ ).

Изменение внутренней энергии

$$\Delta u = u_2 - u_1 = h_2 - p_2 v - h_1 - p_1 v = h_2 - h_1 - v p_2 - p_1 \cdot$$

Внешняя работа газа

$$l = \int_1^2 p dv = 0.$$

Количество теплоты, сообщаемое газу или отнимаемое в процессе,

$$q = \Delta u + l \text{ или } q = \Delta u.$$

Изображение процесса в координатах  $p$ - $T$ ,  $p$ - $v$ ,  $T$ - $v$  и  $T$ - $s$  (рис. 10).

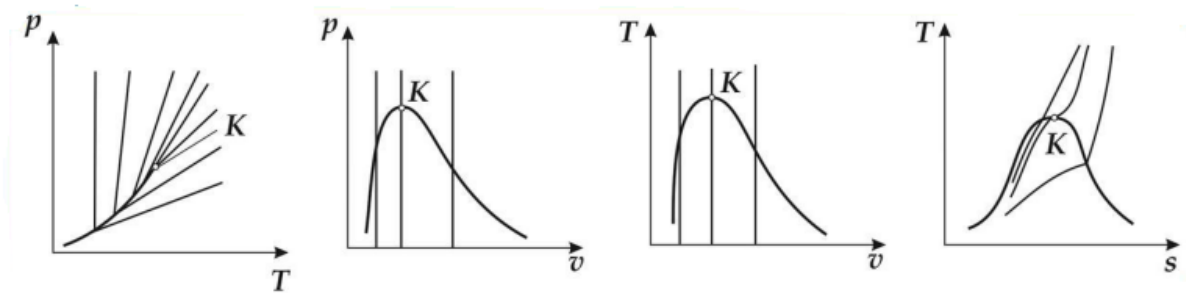


Рис. 10. Изохорный процесс

### Изобарный процесс

Процесс, происходящий при постоянном давлении, называется изобарным ( $p = \text{const}$ ).

Изменение внутренней энергии

$$\Delta u = u_2 - u_1 = h_2 - p_2 v_2 - h_1 - p_1 v_1 .$$

Внешняя работа газа

$$l = q - \Delta u = p v_2 - p v_1 .$$

Количество теплоты, сообщаемое газу или отнимаемое в процессе,

$$q = h_2 - h_1.$$

Изображение процесса в координатах  $p-T$ ,  $p-v$ ,  $T-v$  и  $T-s$  (рис. 11).

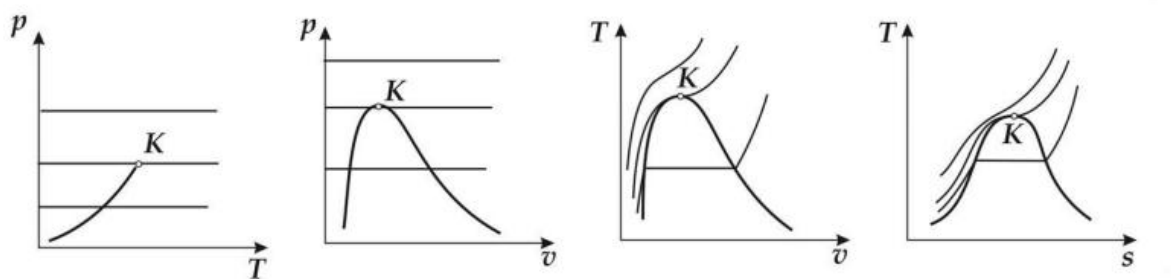


Рис. 11. Изобарный процесс

### Изотермический процесс

Процесс, происходящий при постоянной температуре, называется изотермическим ( $t = \text{const}$ ).

Изменение внутренней энергии

$$\Delta u = u_2 - u_1 = h_2 - p_2 v_2 - h_1 - p_1 v_1 .$$

Внешняя работа газа

$$l = q - \Delta u .$$

Количество теплоты, сообщаемое газу или отнимаемое в процессе,

$$q = T s_2 - s_1 .$$

Изображение процесса в координатах  $p-T$ ,  $p-v$ ,  $T-v$  и  $T-s$  (рис. 12).

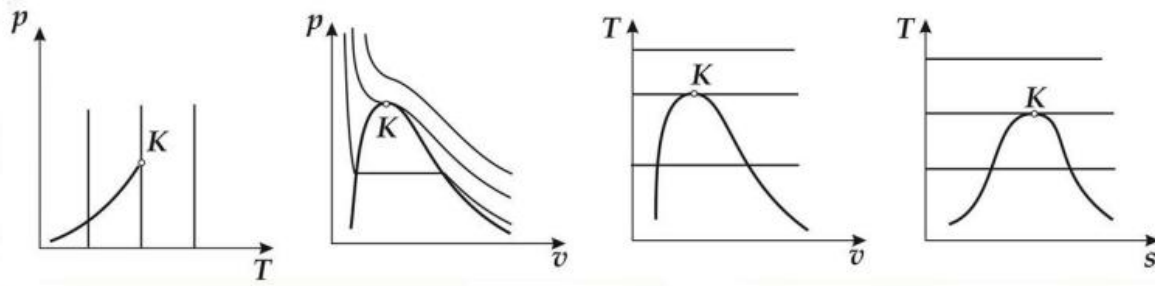


Рис. 12. Изотермический процесс

### Адиабатный процесс

Процесс, происходящий без теплообмена между газом и окружающей средой, называется адиабатным ( $dq = 0$ ,  $s = \text{const}$ ).

Изменение внутренней энергии

$$\Delta u = u_2 - u_1 = h_2 - p_2 v_2 - h_1 - p_1 v_1 .$$

Внешняя работа газа

$$l = q - \Delta u = -\Delta u .$$

Количество теплоты, сообщаемое газу или отнимаемое в процессе,

$$q = 0 .$$

Изображение процесса в координатах  $p-T$ ,  $p-v$ ,  $T-v$  и  $T-s$  (рис. 13).

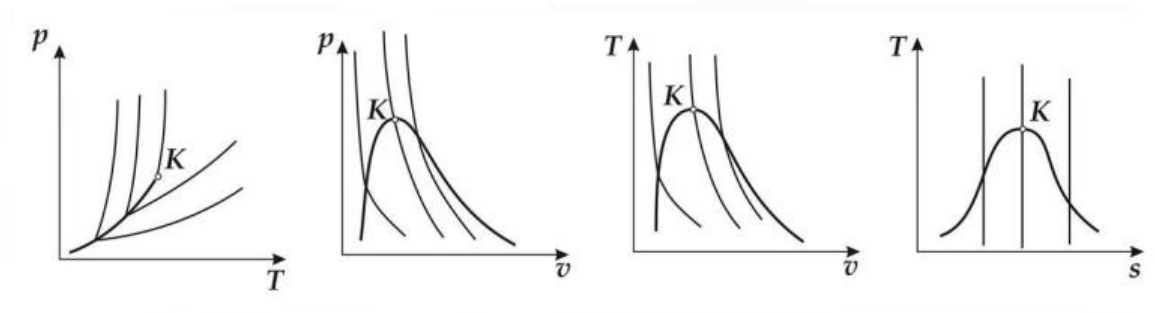


Рис. 13. Адиабатный процесс



## Политропный процесс

Реальные процессы сжатия в газовых двигателях и компрессорах часто не являются ни адиабатными, ни изотермическими, а занимают промежуточное положение между этими двумя видами процессов. Поэтому обычно встречаемые на практике значения показателя  $n$  политропного процесса лежат в интервале от 1 до  $k$ .

Для любых точек на политропе можно записать уравнение в виде

$$p_1 v_1^n = p_2 v_2^n.$$

Внешняя работа газа

$$l = \int_1^2 p dv;$$
$$l = \frac{p_1 v_1}{n-1} \left( 1 - \left( \frac{v_1}{v_2} \right)^{n-1} \right) \quad \text{или} \quad l = \frac{p_1 v_1}{n-1} \left( 1 - \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} \right).$$

Изменение внутренней энергии

$$\Delta u = u_2 - u_1 = h_2 - p_2 v_2 - h_1 - p_1 v_1.$$

Количество теплоты, сообщаемое газу или отнимаемое в процессе,

$$q = \Delta u + l.$$

Термодинамические процессы для реальных газов рассчитывают с помощью таблиц или диаграмм рабочих веществ.

## ЗАДАНИЯ

### Задание 1

1 кг рабочего тела с начальным давлением  $p_1$  и начальной температурой  $t_1$  сжимается в компрессоре до давления  $p_2$ . Сжатие производится по изотерме, по адиабате и политропе с показателем политропы  $n$ .

Показатель адиабаты рабочего тела в состоянии идеального газа можно вычислить как отношение теплоемкостей  $c_p/c_v$ . Для определения  $c_v$  использовать уравнение Майера.

Определить:

- начальный и конечный объемы газа, а также конечную температуру газа;
- работу процесса сжатия;
- количество подведенной (или отведенной) теплоты;
- изменение внутренней энергии.

Для каждого из процессов выполнить расчеты, считая газ идеальным.

Дать изображения на одном рисунке всех рассматриваемых процессов в диаграммах  $p\nu$  и  $Ts$  (без масштаба).

Составить сводную таблицу результатов расчета и сделать выводы по полученным результатам.

Варианты задания приведены в табл. 4.

### Требования к отчету

В письменном отчете по выполненной работе должен быть представлен подробный расчет каждой из определяемых величин. Сначала приводится уравнение, лежащее в основе вычисления, затем с уравнением (в буквенном виде) проводятся необходимые преобразования и лишь потом подставляются соответствующие числовые значения величин и производятся вычисления.

Расчеты должны сопровождаться краткими пояснениями.

Указать в конце отчета основную и справочную литературу, которая использовалась при выполнении задания.

Таблица 4

№ варианта	Хладагент	$t_1$ , °C	$P_1$ , МПа	$P_2$ , МПа	$n$	$c_p$ , кДж/(кг·К)	$\mu$
1	R22	20	0,10000	0,70000	1,2	0,68	86,48
2	R22	10	0,10000	0,40000	1,4	0,67	86,48
3	R22	-10	0,05000	0,30000	1,3	0,65	86,48
4	R12	10	0,05051	0,21915	1,1	0,62	120,92
5	R12	20	0,10060	0,30910	1,1	0,62	120,92
6	R12	-10	0,05051	0,15090	1,3	0,62	120,92
7	R13	-60	0,03331	0,18020	1,3	0,60	104,47
8	R13	-60	0,02348	0,10970	1,4	0,60	104,47
9	R13	-40	0,02348	0,18020	1,1	0,60	104,47
10	R717	0	0,09310	0,29106	1,2	2,07	17,03
11	R717	10	0,09310	0,43017	1,1	2,07	17,03
12	R717	-15	0,07169	0,19015	1,4	2,07	17,03
13	R22	0	0,07000	0,30000	1,2	0,65	86,48
14	R22	10	0,05000	0,40000	1,3	0,67	86,48
15	R22	0	0,10000	0,40000	1,2	0,68	86,48
16	R12	0	0,06430	0,18300	1,2	0,62	120,92
17	R12	10	0,08088	0,21960	1,3	0,62	120,92
18	R12	0	0,05051	0,18300	1,2	0,62	120,92
19	R13	-50	0,04619	0,1802	1,3	0,60	104,47
20	R13	-50	0,03331	0,28100	1,2	0,60	104,47
21	R13	-50	0,02348	0,1097	1,4	0,60	104,47
22	R717	-5	0,05448	0,23636	1,1	2,07	17,03
23	R717	10	0,05448	0,29106	1,2	2,07	17,03
24	R717	0	0,07169	0,23636	1,4	2,07	17,03
25	R22	10	0,10000	0,60000	1,2	0,68	86,48
26	R22	10	0,10000	0,40000	1,4	0,67	86,48
27	R22	-10	0,05000	0,30000	1,3	0,65	86,48
28	R12	10	0,05051	0,21915	1,1	0,62	120,92
29	R12	10	0,10060	0,30910	1,1	0,62	120,92
30	R12	-10	0,05051	0,15090	1,3	0,62	120,92

## Задание 2

1 кг рабочего тела с начальным давлением  $p_1$  и начальной температурой  $t_1$  сжимается в компрессоре до давления  $p_2$ . Сжатие производится по изотерме, по адиабате и политропе с показателем политропы  $n$ .

Определить:

- начальный и конечный объемы газа, а также конечную температуру газа;
- работу процесса сжатия;
- количество подведенной (или отведенной) теплоты;
- изменение внутренней энергии.

Для каждого из процессов выполнить расчеты, считая газ реальным.

Составить сводную таблицу результатов расчета и сделать выводы по полученным результатам.

Варианты задания приведены в табл. 5.

### Требования к отчету

В письменном отчете по выполненной работе должен быть представлен подробный расчет каждой из определяемых величин. Сначала приводится уравнение, лежащее в основе вычисления, затем с уравнением (в буквенном виде) проводятся необходимые преобразования и лишь потом подставляются соответствующие числовые значения величин и производятся вычисления.

Расчеты должны сопровождаться краткими пояснениями.

При расчете политропного процесса считать уравнение  $pv^n = \text{const}$  для реального газа справедливым.

Определение параметров и расчеты процессов проводить с помощью таблиц термодинамических свойств и диаграмм.

Указать в конце отчета основную и справочную литературу, которая использовалась при выполнении задания.

Таблица 5

№ варианта	Хладагент	$t_1$ , °C	$P_1$ , МПа	$P_2$ , МПа	$n$
1	R22	20	0,10000	0,70000	1,2
2	R22	10	0,10000	0,40000	1,4
3	R22	-10	0,05000	0,30000	1,3
4	R12	10	0,05051	0,21915	1,1
5	R12	20	0,10060	0,30910	1,1
6	R12	-10	0,05051	0,15090	1,3
7	R13	-60	0,03331	0,18020	1,3
8	R13	-60	0,02348	0,10970	1,4
9	R13	-40	0,02348	0,18020	1,1
10	R717	0	0,09310	0,29106	1,2
11	R717	10	0,09310	0,43017	1,1
12	R717	-15	0,07169	0,19015	1,4
13	R22	0	0,07000	0,30000	1,2
14	R22	10	0,05000	0,40000	1,3
15	R22	0	0,10000	0,40000	1,2
16	R12	0	0,06430	0,18300	1,2
17	R12	10	0,08088	0,21960	1,3
18	R12	0	0,05051	0,18300	1,2
19	R13	-50	0,04619	0,1802	1,3
20	R13	-50	0,03331	0,28100	1,2
21	R13	-50	0,02348	0,1097	1,4
22	R717	-5	0,05448	0,23636	1,1
23	R717	10	0,05448	0,29106	1,2
24	R717	0	0,07169	0,23636	1,4
25	R22	10	0,10000	0,60000	1,2
26	R22	10	0,10000	0,40000	1,4
27	R22	-10	0,05000	0,30000	1,3
28	R12	10	0,05051	0,21915	1,1
29	R12	10	0,10060	0,30910	1,1
30	R12	-10	0,05051	0,15090	1,3

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лабораторный практикум по термодинамике: Учеб. пособие / С.Н. Богданов, Г.Н. Данилова, А.В. Клецкий, А.В. Куприянова, В.Н. Филаткин, М.Г. Щербов и др. – СПб.: НИУ ИТМО; ИХиБТ, 2012. – 82 с.
2. Теоретические основы хладотехники. Ч. 1. Термодинамика / Под ред. Э.И. Гуйго. – М.: Колос, 1994. – 288 с.
3. **Цветков О.Б., Лаптев Ю.А.** Таблицы свойств холодильных агентов. – СПб.: НИУ ИТМО, ИХиБТ, 2013. – 52 с.
4. **Перельштейн И.И.** Таблицы и диаграммы термодинамических свойств фреонов 12, 13, 22. – М.: ВНИХИ, 1971. – 90 с.
5. Таблицы термодинамических свойств газов и жидкостей. Вып. 2: Фреон 22. – М.: Изд-во стандартов, 1978. – 590 с.

# ПРИЛОЖЕНИЯ

## Приложение 1

Таблица 1.1

### Термодинамические свойства перегретых паров хладагента R12

$t$ , °C	$\nu \cdot 10^3$ , м <sup>3</sup> /кг	$h$ , кДж/кг	$s$ , кДж/(кг·К)	$\nu \cdot 10^3$ , м <sup>3</sup> /кг	$h$ , кДж/кг	$s$ , кДж/(кг·К)
$t_H = -45$ °C ( $p = 0,05051$ МПа)			$t_H = -40$ °C ( $p = 0,0643$ МПа)			
-10	0,3530	550,88	4,6719	0,2762	550,62	4,6546
0	0,3671	556,70	4,6936	0,2874	556,47	4,6764
10	0,3811	562,60	4,7148	0,2984	562,40	4,6977
20	0,3950	568,60	4,7356	0,3095	568,42	4,7186
30	0,4090	574,69	4,7560	0,3205	574,53	4,7391
$t_H = -35$ °C ( $p = 0,08088$ МПа)			$t_H = -30$ °C ( $p = 0,1006$ МПа)			
-10	0,2184	550,31	4,6379	0,1745	549,93	4,6219
0	0,2274	556,19	4,6599	0,1818	555,86	4,6439
10	0,2363	562,15	4,6813	0,1890	561,85	4,6655
20	0,2452	568,19	4,7023	0,1962	567,92	4,6866
30	0,2540	574,32	4,7228	0,2034	574,08	4,7072
$t_H = -20$ °C ( $p = 0,1513$ МПа)			$t_H = -15$ °C ( $p = 0,183$ МПа)			
-10	0,1142	548,95	4,5911	0,09343	548,31	4,5762
0	0,1193	554,98	4,6136	0,09770	554,42	4,5990
10	0,1242	561,07	4,6355	0,1019	560,57	4,6211
20	0,1291	567,22	4,6568	0,1060	566,77	4,6427
30	0,1340	573,44	4,6777	0,1101	573,03	4,6637
40	0,1388	579,73	4,6981	0,1141	579,36	4,6842
50	0,1436	586,09	4,7181	0,1181	585,75	4,7043
60	0,1484	592,52	4,7377	0,1221	592,20	4,7240
70	0,1531	599,02	4,7569	0,1261	598,73	4,7433
80	0,1578	605,59	4,7758	0,1300	605,32	4,7622

Окончание табл. 1.1

$t$ , °C	$\nu \cdot 10^3$ , м <sup>3</sup> /кг	$h$ , кДж/кг	$s$ , кДж/(кг·К)	$\nu \cdot 10^3$ , м <sup>3</sup> /кг	$h$ , кДж/кг	$s$ , кДж/(кг·К)
	$t_H = -10$ °C ( $p = 0,2196$ МПа)			$t_H = 0$ °C ( $p = 0,3091$ МПа)		
0	0,08056	553,76	4,5847	0,05566	552,06	4,5567
10	0,08414	559,98	4,6071	0,05837	558,49	4,5798
20	0,08766	566,25	4,6289	0,06100	564,92	4,6021
30	0,09112	572,56	4,6500	0,06358	571,37	4,6237
40	0,09454	578,93	4,6707	0,06610	577,84	4,6448
50	0,09792	585,35	4,6909	0,06858	584,36	4,6653
60	0,1013	591,84	4,7107	0,07104	590,93	4,6853
70	0,1046	598,39	4,7300	0,07347	597,55	4,7049
80	0,1079	605,00	4,7490	0,07588	604,22	4,7240
90	0,1112	611,68	4,7677	0,07827	610,95	4,7428

Таблица 1.2

**Термодинамические свойства перегретых паров хладагента R13**

$t$ , °C	$\nu \cdot 10^3$ , м <sup>3</sup> /кг	$h$ , кДж/кг	$s$ , кДж/(кг·К)	$\nu \cdot 10^3$ , м <sup>3</sup> /кг	$h$ , кДж/кг	$s$ , кДж/(кг·К)
	$t_H = -105$ °C ( $p = 0,02348$ МПа)			$t_H = -100$ °C ( $p = 0,03331$ МПа)		
-70	0,6832	474,23	4,5810	0,4801	474,05	4,5525
-60	0,7177	479,51	4,6064	0,5046	479,35	4,5780
-50	0,7521	484,92	4,6312	0,5290	484,78	4,6029
-40	0,7864	490,48	4,6555	0,5533	490,35	4,6273
-30	0,8206	496,17	4,6794	0,5776	496,06	4,6513
-20	0,8549	502,0	4,7029	0,6018	501,90	4,6748
	$t_H = -95$ °C ( $p = 0,04619$ МПа)			$t_H = -90$ °C ( $p = 0,06276$ МПа)		
-70	0,3447	473,80	4,5256	0,2523	473,48	4,5001
-60	0,3626	479,13	4,5513	0,2656	478,86	4,5259
-50	0,3803	484,59	4,5763	0,2788	484,35	4,5511
-40	0,3979	490,19	4,6008	0,2919	489,97	4,5758
-30	0,4155	495,91	4,6248	0,3049	495,72	4,599
-20	0,4330	501,76	4,6484	0,3179	501,59	4,6236



Окончание табл. 1.2

$t, \text{ }^\circ\text{C}$	$\nu \cdot 10^3, \text{ м}^3/\text{кг}$	$h, \text{ кДж/кг}$	$s, \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$	$\nu \cdot 10^3, \text{ м}^3/\text{кг}$	$h, \text{ кДж/кг}$	$s, \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$
	$t_{\text{н}} = -85 \text{ }^\circ\text{C} (p = 0,08369 \text{ МПа})$			$t_{\text{н}} = -80 \text{ }^\circ\text{C} (p = 0,1097 \text{ МПа})$		
-70	0,1878	473,08	4,4758	0,1419	472,56	4,4524
-60	0,1979	478,51	4,5018	0,1498	478,06	4,4788
-50	0,2080	484,05	4,5272	0,1576	483,66	4,5044
-40	0,2179	489,70	4,5520	0,1653	489,36	4,5294
-30	0,2278	495,48	4,5763	0,1729	495,17	4,5539
-20	0,2376	501,37	4,6000	0,1805	501,10	4,5778
-10	0,2474	507,39	4,6234	0,1880	507,15	4,6012
0	0,2571	513,53	4,6463	0,1955	513,31	4,6242
10	0,2668	519,79	4,6688	0,2029	519,59	4,6467
20	0,2765	526,17	4,6909	0,2104	525,98	4,6689
30	0,2862	532,66	4,7127	0,2178	532,48	4,6907
40	0,2958	539,26	4,7341	0,2252	539,09	4,7122
50	0,3055	545,97	4,7552	0,2326	545,81	4,7333
60	0,3151	552,78	4,7760	0,2400	542,64	4,7541
70	0,3247	559,70	4,7964	0,2473	559,56	4,7746
80	0,3344	566,72	4,8166	0,2547	566,59	4,7948
	$t_{\text{н}} = -70 \text{ }^\circ\text{C} (p = 0,1802 \text{ МПа})$			$t_{\text{н}} = -60 \text{ }^\circ\text{C} (p = 0,281 \text{ МПа})$		
-70	0,08411	471,12	4,4077	–	–	–
-60	0,08922	476,82	4,4351	0,05530	474,95	4,3933
-50	0,1211	483,18	4,4826	0,05874	480,98	4,4209
-40	0,1272	488,94	4,5078	0,06206	487,02	4,4474
-30	0,1331	494,80	4,5324	0,06529	493,10	4,4730
-20	0,1391	500,76	4,5565	0,06846	499,25	4,4978
-10	0,1450	506,84	4,5800	0,07158	505,48	4,4219
0	0,1508	513,03	4,6031	0,07467	511,79	4,5454
10	0,1566	519,33	4,6258	0,07771	518,20	4,5685
20	0,1625	525,74	4,6480	0,08074	524,70	4,5910
30	0,1682	532,26	4,6699	0,08374	531,30	4,6132
40	0,1740	538,89	4,6914	0,08672	537,99	4,6349
50	0,1798	545,62	4,7126	0,08969	544,78	4,6562
60	0,1855	552,46	4,7334	0,09265	551,67	4,6772
70	0,1912	559,40	4,7539	0,09560	558,65	4,6979
80	0,1970	566,43	4,7741	0,09854	565,72	4,7182

Таблица 1.3

## Термодинамические свойства перегретых паров хладагента R22

$t$ , °C	$\nu \cdot 10^3$ , м <sup>3</sup> /кг	$h$ , кДж/кг	$s$ , кДж/(кг·К)	$\nu \cdot 10^3$ , м <sup>3</sup> /кг	$h$ , кДж/кг	$s$ , кДж/(кг·К)
$p = 0,05$ МПа ( $t_H = -54,85$ °C )				$p = 0,07$ МПа ( $t_H = -48,43$ °C )		
-20	480,5	701,04	1,9464	341,3	700,58	1,9127
-10	500,3	707,18	1,9702	355,7	706,77	1,9367
0	520,0	713,42	1,9935	369,9	713,05	1,9602
10	539,7	719,77	2,0163	384,1	719,43	1,9831
20	559,3	726,22	2,0387	398,3	725,92	2,0056
30	578,9	732,78	2,0607	412,3	732,50	2,0277
40	598,4	739,45	2,0823	426,4	739,19	2,0493
$p = 0,1$ МПа ( $t_H = -41,12$ °C )				$p = 0,15$ МПа ( $t_H = -32,11$ °C )		
-20	237,0	699,88	1,8764	155,8	698,68	1,8339
-10	247,2	706,14	1,9007	162,8	705,08	1,8588
0	257,4	712,49	1,9243	169,8	711,54	1,8829
10	267,4	718,93	1,9475	176,7	718,07	1,9063
20	277,5	725,46	1,9702	183,5	724,68	1,9292
30	287,4	732,08	1,9924	190,2	731,38	1,9517
40	297,3	738,81	2,0142	196,9	738,16	1,9738
$p = 0,3$ МПа ( $t_H = -14,69$ °C )				$p = 0,4$ МПа ( $t_H = -6,58$ °C )		
-10	78,27	701,72	1,7828	–	–	–
0	82,07	708,57	1,8083	60,07	706,46	1,7749
10	85,79	715,41	1,8329	63,01	713,54	1,8004
20	89,43	722,28	1,8567	65,87	720,61	1,8250
30	93,01	729,20	1,8799	68,67	727,69	1,8487
40	96,55	736,17	1,9026	71,42	734,80	1,8717
50	100,0	743,21	1,9247	74,12	741,95	1,8942
60	103,5	750,32	1,9464	76,78	749,17	1,9162
70	106,9	757,51	1,9676	79,43	756,44	1,9378
80	110,4	764,78	1,9885	82,05	763,79	1,9589
90	113,8	772,14	2,0091	84,64	771,22	1,9796

Окончание табл. 1.3

$t$ , °C	$\nu \cdot 10^3$ , м <sup>3</sup> /кг	$h$ , кДж/кг	$s$ , кДж/(кг·К)	$\nu \cdot 10^3$ , м <sup>3</sup> /кг	$h$ , кДж/кг	$s$ , кДж/(кг·К)
	$p = 0,3$ МПа ( $t_H = -14,69$ °C )			$p = 0,4$ МПа ( $t_H = -6,58$ °C )		
100	117,1	779,59	2,0293	87,22	778,73	2,0000
110	120,5	787,12	2,0492	89,78	786,31	2,0201
120	123,8	794,75	2,0689	92,33	793,98	2,0398
130	153,0	802,82	2,1064	94,87	801,74	2,0593
140	157,0	810,60	2,1255	97,40	809,58	2,0785
150	160,9	818,47	2,1443	99,91	817,51	2,0975
160	164,9	826,43	2,1629	102,4	825,52	2,1162
170	168,8	834,48	2,1813	104,9	833,61	2,1346
180	172,8	842,62	2,1994	107,4	841,79	2,1529
	$p = 0,6$ МПа ( $t_H = 5,85$ °C )			$p = 0,7$ МПа ( $t_H = 10,92$ °C )		
10	40,12	709,55	1,7510	–	–	–
20	42,32	717,08	1,7771	35,43	715,19	1,7575
30	44,26	724,53	1,8021	37,26	722,86	1,7832
40	46,23	731,94	1,8262	39,02	730,45	1,8087
50	48,16	739,36	1,8495	40,72	738,01	1,8316
60	50,04	746,79	1,8721	42,38	745,56	1,8548
70	51,89	754,26	1,8942	44,01	753,13	1,8770
80	65,05	762,79	1,9354	45,61	760,73	1,8988
90	67,17	770,29	1,9563	47,19	768,38	1,9202
100	69,27	777,86	1,9769	48,75	776,08	1,9411
110	71,35	785,51	1,9971	50,29	783,84	1,9616
120	73,42	793,23	2,0170	51,81	791,66	1,9818
130	75,48	801,02	2,0366	53,32	799,55	2,0016
140	77,53	808,90	2,0559	54,82	807,51	2,0211
150	79,57	816,86	2,0749	56,31	815,55	2,0403
160	81,60	824,90	2,0937	57,79	823,66	2,0593
170	83,62	833,02	2,1122	59,27	831,84	2,0780
180	85,64	841,22	2,1305	60,74	840,11	2,0964
190	87,65	849,51	2,1486	62,20	848,45	2,1146
200	89,65	857,88	2,1665	63,66	856,86	2,1326

Таблица 1.4

## Термодинамические свойства перегретых паров хладагента R717

$t$ , °C	$v$ , м <sup>3</sup> /кг	$h$ , кДж/кг	$s$ , кДж/(кг·К)	$v$ , м <sup>3</sup> /кг	$h$ , кДж/кг	$s$ , кДж/(кг·К)
	$t_{\text{н}} = -50$ °C ( $p = 0,04082$ МПа)			$t_{\text{н}} = -45$ °C ( $p = 0,05448$ МПа)		
-15	3,063	1765,6	7,750	2,289	1764,2	7,604
-5	3,186	1786,6	7,829	2,382	1785,4	7,685
0	3,247	1797,1	7,866	2,428	1796,0	7,724
10	3,368	1818,2	7,944	2,520	1817,2	7,800
20	3,490	1839,4	8,017	2,611	1838,4	7,874
30	3,611	1860,6	8,089	2,702	1859,8	7,946
40	3,733	1882,0	8,158	2,793	1881,2	8,015
	$t_{\text{н}} = -40$ °C ( $p = 0,07169$ МПа)			$t_{\text{н}} = -35$ °C ( $p = 0,09310$ МПа)		
-15	1,734	1762,3	7,465	1,329	1760,0	7,330
-5	1,805	1783,8	7,546	1,384	1781,8	7,413
0	1,840	1794,5	7,586	1,412	1792,6	7,453
10	1,910	1815,9	7,663	1,467	1814,2	7,531
20	1,980	1837,3	7,737	1,521	1835,8	7,606
30	2,050	1858,8	7,809	1,575	1857,5	7,678
40	2,120	1880,3	7,879	1,629	1879,2	7,749
	$t_{\text{н}} = -20$ °C ( $p = 0,1901$ МПа)			$t_{\text{н}} = -15$ °C ( $p = 0,2362$ МПа)		
-15	0,638	1749,3	6,950	–	–	–
-5	0,667	1772,5	7,038	0,532	1768,0	6,919
0	0,681	1784,0	7,080	0,544	1779,8	6,962
10	0,709	1806,7	7,162	0,566	1803,1	7,046
20	0,736	1829,3	7,240	0,589	1826,1	7,126
30	0,764	1851,7	7,315	0,612	1848,8	7,202
40	0,790	1873,0	7,388	0,634	1871,5	7,276
50	0,818	1896,3	7,458	0,656	1894,1	7,347
60	0,844	1918,6	7,526	0,678	1916,6	7,415
70	0,871	1941,0	7,592	0,699	1939,2	7,482
80	0,898	1963,4	7,656	0,720	1961,8	7,547
90	0,923	1985,8	7,719	0,742	1984,5	7,610
100	0,950	2008,6	7,781	0,763	2007,2	7,672
110	0,976	2031,3	7,841	0,784	2030,0	7,733

Окончание табл. 1.4

$t$ , °C	$v$ , м <sup>3</sup> /кг	$h$ , кДж/кг	$s$ , кДж/(кг·К)	$v$ , м <sup>3</sup> /кг	$h$ , кДж/кг	$s$ , кДж/(кг·К)
	$t_H = -10$ °C ( $p = 0,2908$ МПа)			$t_H = 0$ °C ( $p = 0,4296$ МПа)		
-5	0,428	1762,6	6,802	–	–	–
0	0,438	1774,8	6,847	–	–	–
10	0,457	1798,7	6,933	0,303	1787,3	6,711
20	0,476	1822,2	7,014	0,316	1812,3	6,798
30	0,494	1845,5	7,092	0,329	1836,8	6,880
40	0,512	1868,5	7,167	0,342	1860,8	6,958
50	0,530	1891,4	7,239	0,355	1884,6	7,033
60	0,548	1914,2	7,309	0,367	1908,1	7,104
70	0,566	1937,0	7,376	0,380	1931,5	7,174
80	0,583	1959,8	7,442	0,392	1954,8	7,240
90	0,601	1982,6	7,505	0,404	1978,0	7,306
100	0,618	2005,5	7,567	0,416	2001,3	7,369
110	0,636	2028,5	7,628	0,428	2024,7	7,430
120	0,653	2051,6	7,688	0,440	2048,0	7,491

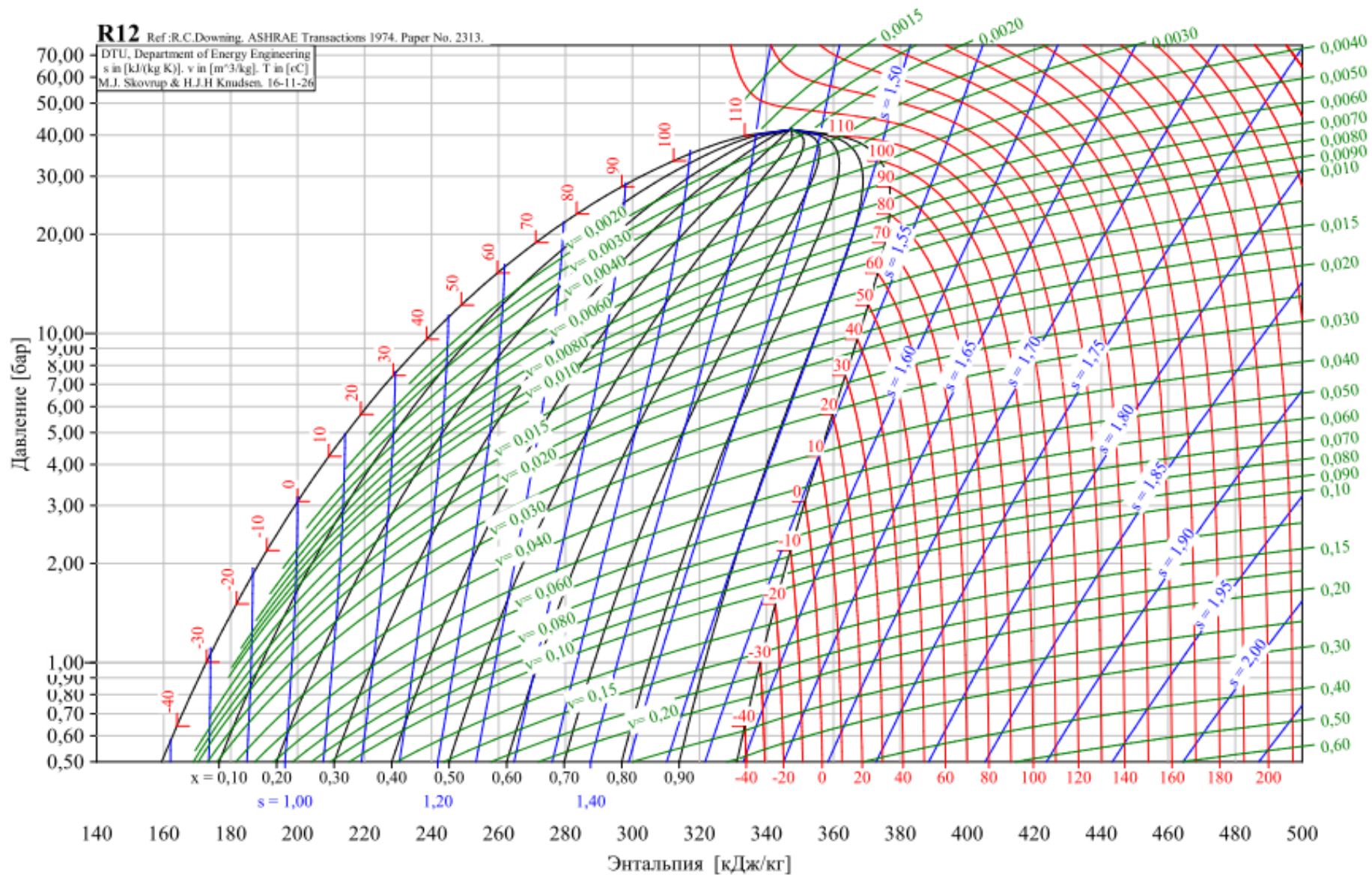
## Диаграммы

- 2.1.  $h$ -lg  $p$  – диаграмма хладагента R12.
- 2.2.  $h$ -lg  $p$  – диаграмма хладагента R13.
- 2.3.  $h$ -lg  $p$  – диаграмма хладагента R22.
- 2.4.  $h$ -lg  $p$  – диаграмма хладагента R717.
- 2.5.  $h$ -lg  $p$  – диаграмма хладагента R404A.
- 2.6.  $h$ -lg  $p$  – диаграмма хладагента R410A.
- 2.7.  $h$ -lg  $p$  – диаграмма хладагента R744.

# R12

DTU, Department of Energy Engineering  
s in [kJ/(kg K)], v in [m<sup>3</sup>/kg], T in [°C]  
M.J. Skovrup & H.J.H. Knudsen, 16-11-26

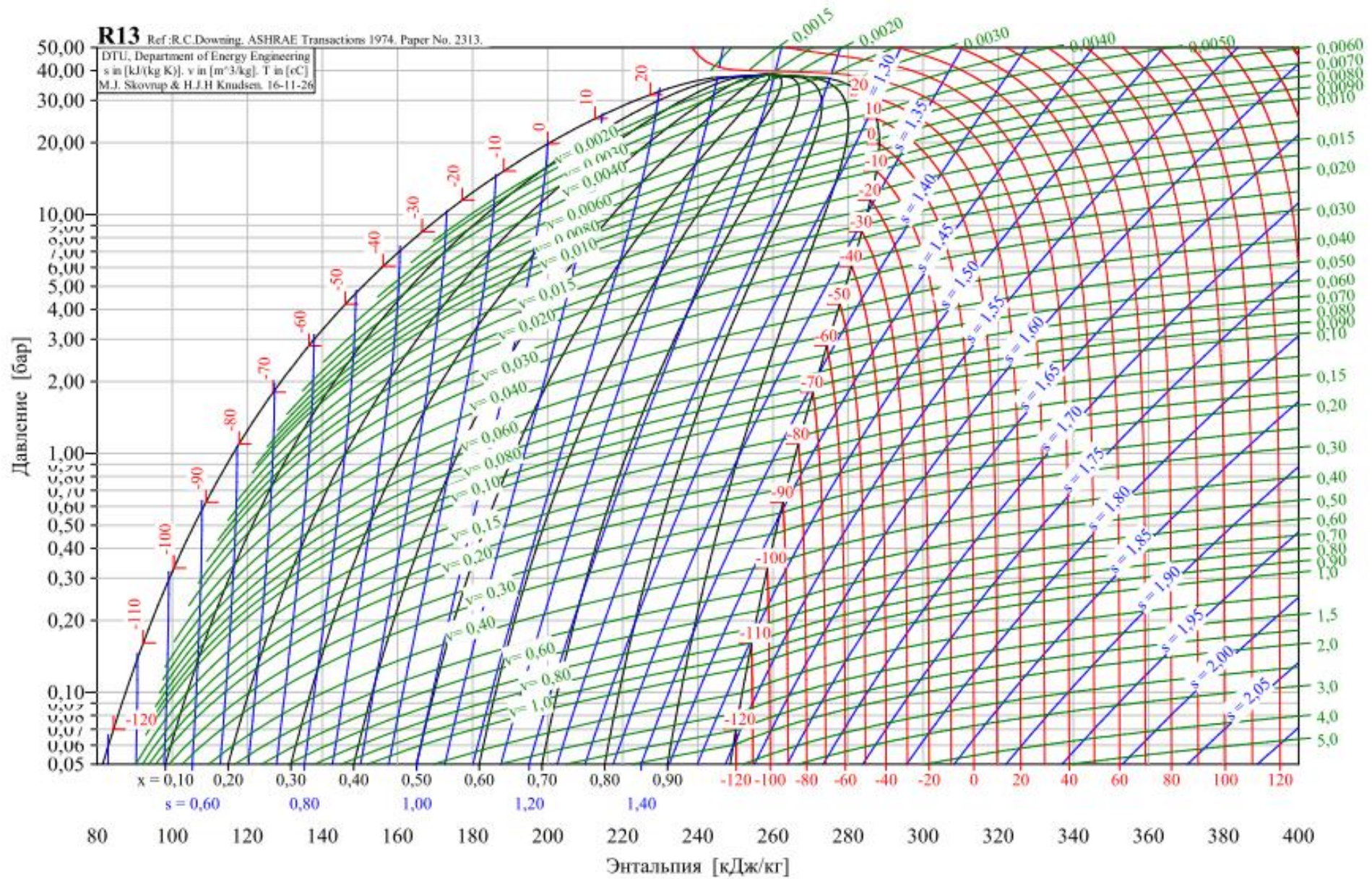
Ref: R.C. Downing, ASHRAE Transactions 1974, Paper No. 2313.





**R13** Ref: R.C. Downing, ASHRAE Transactions 1974, Paper No. 2313.

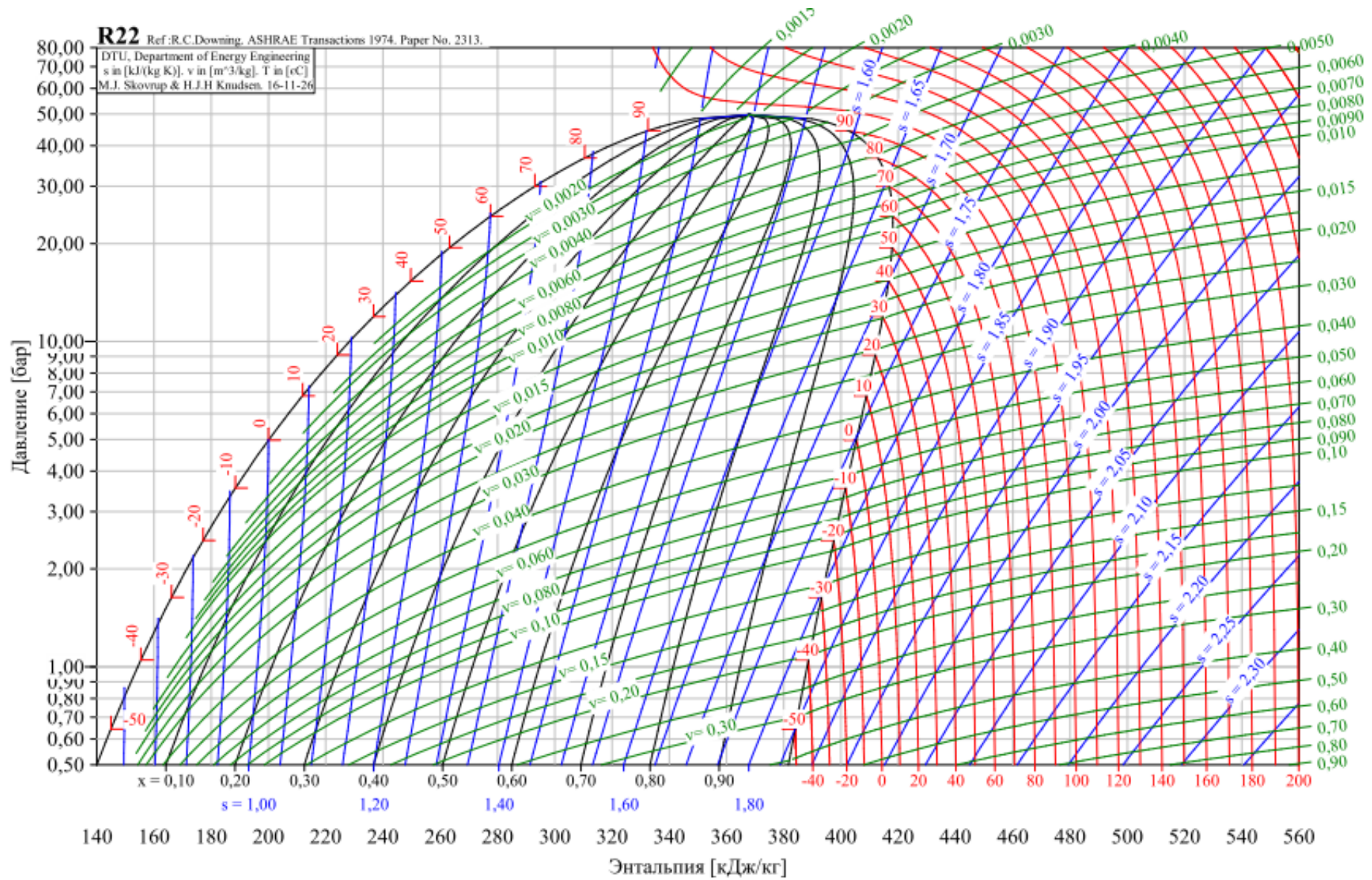
DTU, Department of Energy Engineering  
s in [kJ/(kg K)], v in [m<sup>3</sup>/kg], T in [°C]  
M.J. Skovrup & H.J.H. Knudsen, 16-11-26





**R22** Ref: R.C. Downing, ASHRAE Transactions 1974, Paper No. 2313.

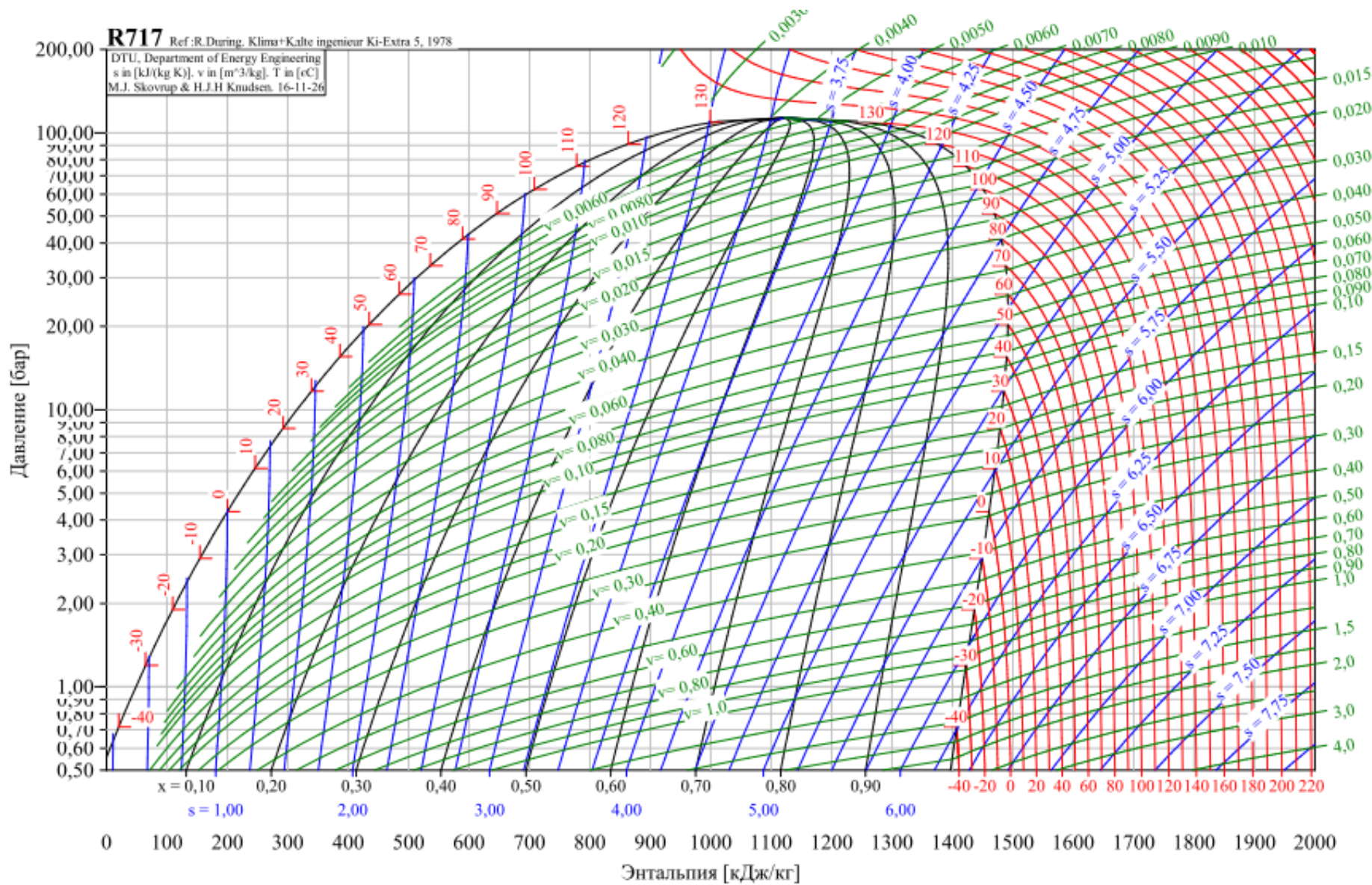
DTU, Department of Energy Engineering  
s in [kJ/(kg K)], v in [m<sup>3</sup>/kg], T in [°C]  
M.J. Skovrup & H.J.H. Knudsen, 16-11-26



# R717

Ref: R. Düring, Klima+Kälte ingenieur Ki-Extra 5, 1978

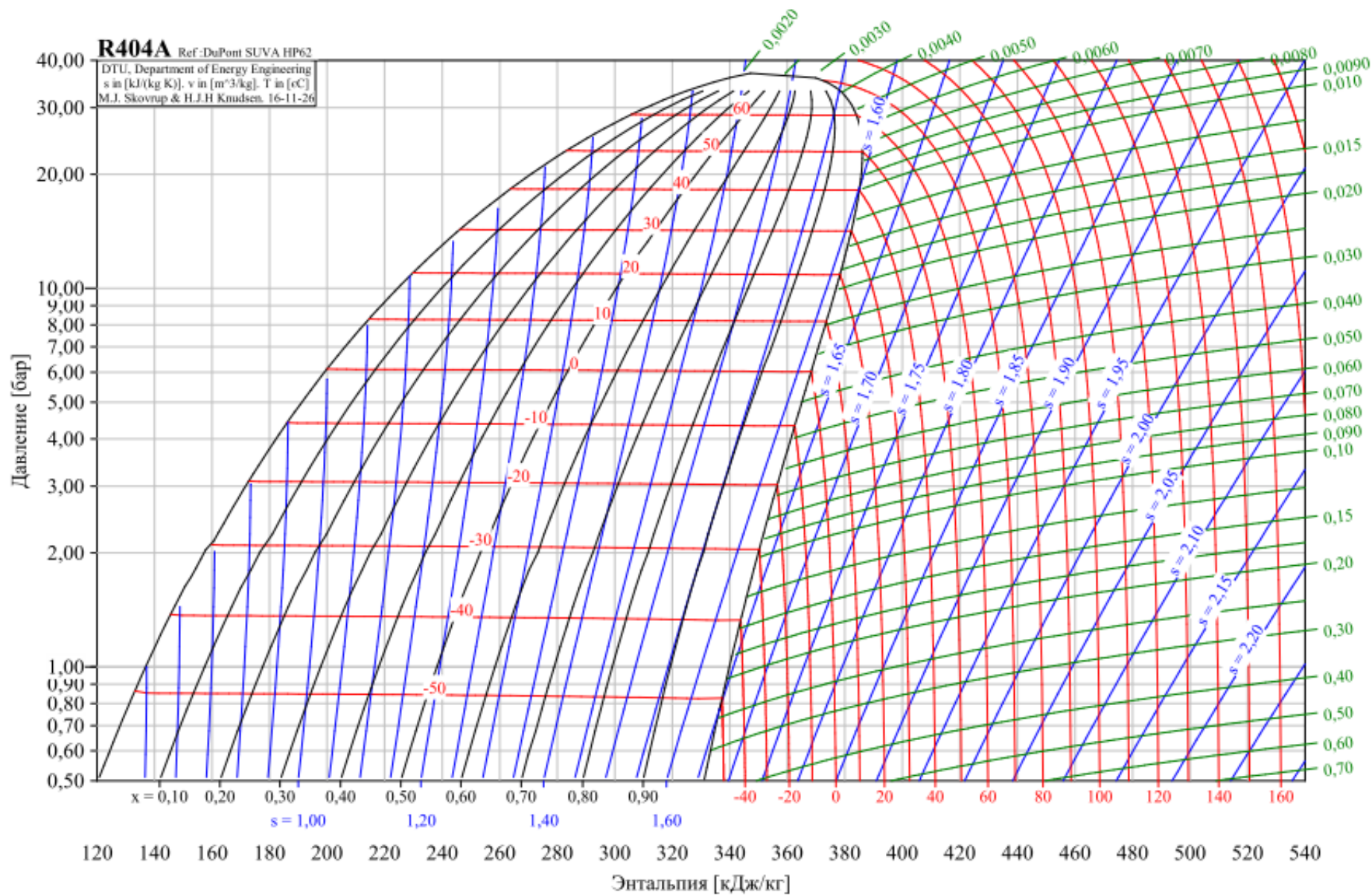
DTU, Department of Energy Engineering  
s in [kJ/(kg K)], v in [m³/kg], T in [°C]  
M.J. Skovrup & H.J.H. Knudsen, 16-11-26





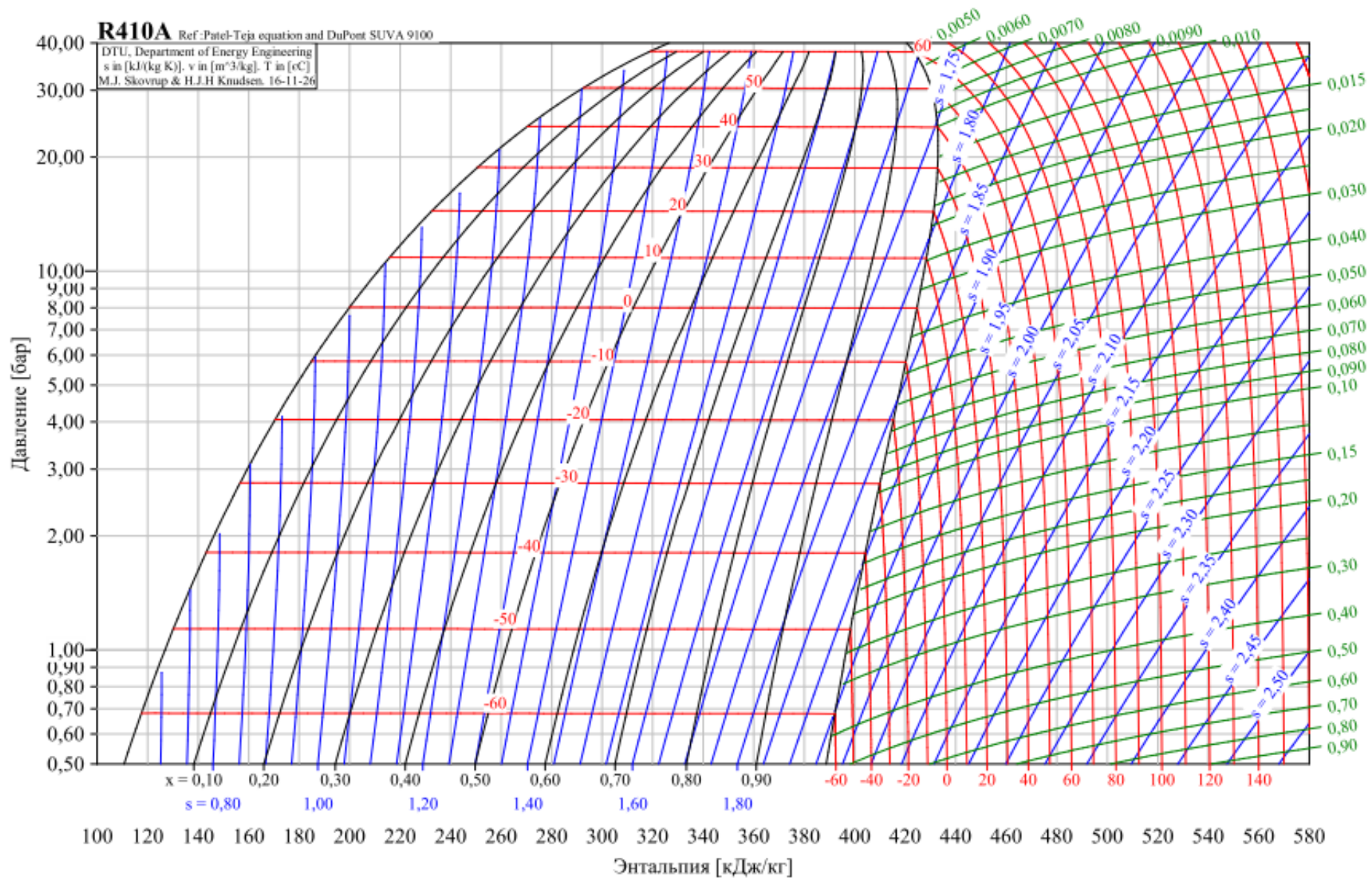
# R404A Ref: DuPont SUVA HP62

DTU, Department of Energy Engineering  
s in [kJ/(kg K)], v in [m<sup>3</sup>/kg], T in [°C]  
M.J. Skovrup & H.J.H. Knudsen, 16-11-26



# R410A Ref. Patel-Teja equation and DuPont SUVA 9100

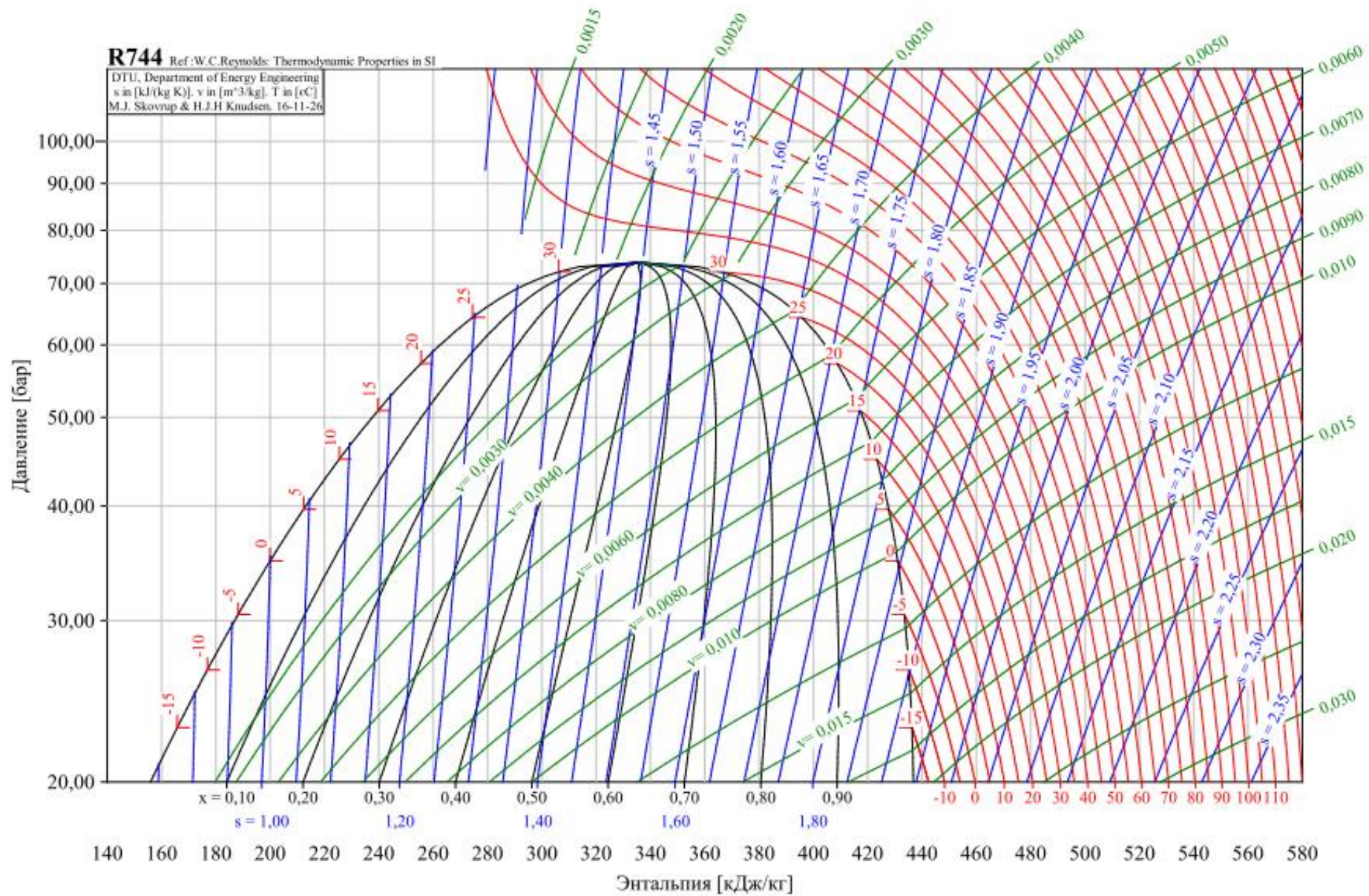
DTU, Department of Energy Engineering  
s in [kJ/(kg K)], v in [m<sup>3</sup>/kg], T in [°C]  
M.J. Skovrup & H.J.H. Knudsen, 16-11-26





**R744**

Ref: W.C. Reynolds: Thermodynamic Properties in SI

DTU, Department of Energy Engineering  
 $s$  in [kJ/(kg K)],  $v$  in [m<sup>3</sup>/kg],  $T$  in [°C]  
M.J. Skovrup & H.J.H. Knudsen, 16-11-26

Пример расчета задания 1

1 кг идеального газа с начальным давлением  $p_1$  и начальной температурой  $t_1$  сжимается в компрессоре до давления  $p_2$ .  
 Сжатие производится по изотерме, по адиабате и политропе с показателем политропы  $n$ .

Показатель адиабаты рабочего тела в состоянии идеального газа можно вычислить как отношение теплоемкостей  $c_p/c_v$ . Для определения  $c_v$  использовать уравнение Майера.

Определить:

- начальный и конечный объем газа, а также конечную температуру газа;
- работу процесса сжатия;
- количество подведенной (или отведенной) теплоты;
- изменение внутренней энергии;

Дать изображение на одном рисунке всех рассматриваемых процессов в диаграммах  $p-v$  и  $T-s$  (без масштаба).

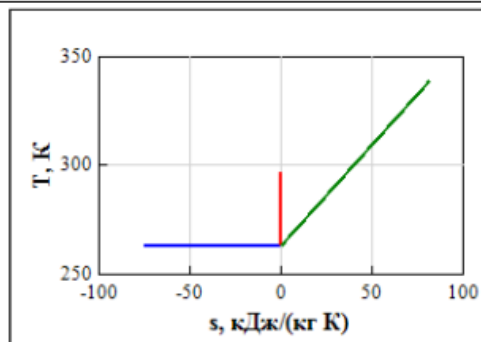
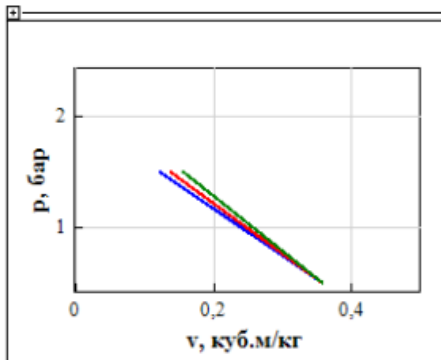
Составить сводную таблицу результатов расчета и сделать выводы по полученным результатам.

**Дано:**

- Холодильный агент  $HA := "R12"$
- Начальная температура  $t_1 := -10 \text{ }^\circ\text{C}$
- Начальное давление  $p_1 := 0,0505 \text{ МПа}$
- Конечное давление  $p_2 := 0,15090 \text{ МПа}$
- Показатель политропы  $n := 1,3$
- Изобарная теплоемкость  $c_p := 620 \frac{\text{Дж}}{\text{кг К}}$
- Молекулярная масса  $\mu := 120,92 \frac{\text{кг}}{\text{кмоль}}$

**Решение:**

- Газовая постоянная  $HA \quad R := \frac{\mu R}{\mu} = 68,8 \frac{\text{Дж}}{\text{кг К}}$
- Изохорная теплоемкость  $c_v := c_p - R = 551,2 \frac{\text{Дж}}{\text{кг К}}$



	T1, K	P1, кПа	v1, м³/кг	T2, K	P2, кПа	v2, м³/кг	q, кДж/кг	Δu, кДж/кг	l, кДж/кг	Δs, кДж/(кг К)
изотермический	263.15	50.50	0.36	263.15	1.51	0.12	-19.81	0.00	-19.81	-0.08
адиабатный	263.15	50.50	0.36	297.11	1.51	0.14	0.00	18.72	-18.72	0.00
политропный	263.15	50.50	0.36	338.77	1.51	0.15	24.36	41.69	-17.33	0.08

## Пример расчета задания 2

1 кг с начальным давлением  $p_1$  и начальной температурой  $t_1$  сжимается в компрессоре до давления  $p_2$ .  
 Сжатие производится по изотерме, по адиабате и политропе с показателем политропы  $n$ .  
 Определить:

- начальный и конечный объем газа, а также конечную температуру газа;
- работу процесса сжатия;
- количество подведенной (или отведенной) теплоты;
- изменение внутренней энергии;

Составить сводную таблицу результатов расчета и сделать выводы по полученным результатам.

**Дано:**

Холодильный агент  $HA := "R12"$

Начальная температура  $t_1 := -10 \text{ }^\circ\text{C}$

Начальное давление  $p_1 := 0,0505 \text{ МПа}$

Конечное давление  $p_2 := 0,15090 \text{ МПа}$

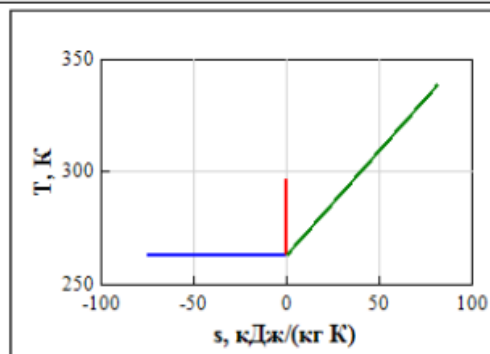
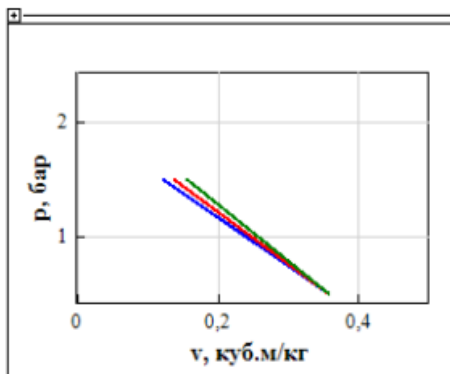
Показатель политропы  $n := 1,3$

Изобарная теплоемкость  $c_p := 620 \frac{\text{Дж}}{\text{кг К}}$

Молекулярная масса  $\mu := 120,92 \frac{\text{кг}}{\text{кмоль}}$

**Решение:**

- \_\_\_\_\_
- Изотермический процесс \_\_\_\_\_
- Адиабатный процесс \_\_\_\_\_
- Политропный процесс \_\_\_\_\_



	T1, K	P1, кПа	v1, м3/кг	T2, K	P2, кПа	v2, м3/кг	q, кДж/кг	Δu, кДж/кг	l, кДж/кг	Δs, кДж/(кг К)
изотермический	263.15	50.50	0.36	263.15	1.51	0.12	-19.81	0.00	-19.81	-0.08
адиабатный	263.15	50.50	0.36	297.11	1.51	0.14	0.00	18.72	-18.72	0.00
политропный	263.15	50.50	0.36	338.77	1.51	0.15	24.36	41.69	-17.33	0.08

	T1, K	P1, кПа	v1, м3/кг	T2, K	P2, кПа	v2, м3/кг	q, кДж/кг	Δu, кДж/кг	l, кДж/кг	Δs, кДж/(кг К)
изотермический	263.15	50.50	0.35	263.15	1.51	0.11	-21.01	-1.19	-19.82	-0.08
адиабатный	263.15	50.50	0.35	300.31	1.51	0.13	0.00	18.52	-18.52	0.00
политропный	263.15	50.50	0.35	340.35	1.51	0.15	23.94	41.03	-17.09	0.08

## СОДЕРЖАНИЕ

СПИСОК ОСНОВНЫХ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	3
ПРЕДИСЛОВИЕ .....	4
ИДЕАЛЬНЫЙ ГАЗ .....	5
ПРОЦЕССЫ ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА.....	8
РЕАЛЬНЫЙ ГАЗ.....	16
ТАБЛИЧНЫЕ ФОРМЫ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ХЛАДАГЕНТОВ .....	19
ДИАГРАММЫ ХОЛОДИЛЬНЫХ АГЕНТОВ .....	20
ПРОЦЕССЫ РЕАЛЬНОГО ГАЗА.....	21
ЗАДАНИЯ .....	26
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....	30
П Р И Л О Ж Е Н И Я .....	31



Митропов Владимир Викторович

**РАСЧЕТ И СОПОСТАВЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ  
ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ  
ДЛЯ ИДЕАЛЬНОГО И РЕАЛЬНЫХ  
РАБОЧИХ ТЕЛ**

**Учебно-методическое пособие**

*Ответственный редактор*

Т.Г. Смирнова

*Титульный редактор*

Е.О. Трусова

*Компьютерная верстка*

В.В. Митропов

*Дизайн обложки*

Н.А. Потехина

*Печатается*

*в авторской редакции*

---

Подписано в печать 19.12.2016. Формат 60×84 1/16

Усл. печ. л. 3,02. Печ. л. 3,25. Уч.–изд. л. 3,0

Тираж 70 экз. Заказ № С 56

---

Университет ИТМО. 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49

Издательско-информационный комплекс  
191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9