МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

В.А. Коротков, Ю.В. Татаренко

# ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ХОЛОДИЛЬНОГО ЦЕНТРОБЕЖНОГО КОМПРЕССОРА И РАЗМЕРОВ РОТОРА НА ОСЕВЫЕ СИЛЫ, ДЕЙСТВУЮЩИЕ НА РОТОР, И ЕГО КРИТИЧЕСКУЮ ЧАСТОТУ ВРАЩЕНИЯ

## Учебно-методическое пособие

УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

Санкт-Петербург
2015

УДК 621.515

**Коротков В.А., Татаренко Ю.В.** Исследование влияния режимов работы холодильного центробежного компрессора и размеров ротора на осевые силы, действующие на ротор, и его критическую частоту вращения: Учеб.-метод. пособие. – СПб.: Университет ИТМО, 2015. – 43 с.

Приведена методика определения осевых сил, действующих на ротор холодильного центробежного компрессора при различных режимах его работы, и размеров разгрузочного поршня (думмиса)

Предназначено для магистрантов направления 16.04.03 Холодильная, криогенная техника и системы жизнеобеспечения по дисциплине «Научно-исследовательская работа» всех форм обучения.

**Рецензент: доктор техн. наук, проф. В.А. Пронин**

**Рекомендовано к печати Советом факультета холодильной, криогенной техники и кондиционирования, протокол № 3 от 30.11.2015 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, 2015

© Коротков В.А., Татаренко Ю.В., 2015

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....4
ЦЕЛЬ И СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ.....5
ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ.....6
ПРИМЕР РАСЧЕТА ОСЕВЫХ СИЛ, ДЕЙСТВУЮЩИХ НА РОТОР ХОЛОДИЛЬНОГО ЦЕНТРОБЕЖНОГО КОМПРЕССОРА.....8
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....23
ПРИЛОЖЕНИЯ.....24

# ВВЕДЕНИЕ

Холодильные центробежные компрессоры могут работать на различных рабочих веществах, при разных, зависящих от условий работы температурах кипения и конденсации. Изменяя в зависимости от этих условий окружные скорости на периферии рабочих колес или переходя на другое рабочее колесо, можно один и тот же холодильный центробежный компрессор использовать в различных холодильных машинах, что позволит значительно сократить затраты на их создание.

Высокая степень унификации – важное требование к современным холодильным центробежным компрессорам. Особенностью современных методов унификации элементов конструкций ЦК является стремление минимизировать число типоразмеров при одновременной тщательной отработке проточных частей с целью снижения газодинамических потерь и повышения КПД компрессоров.

Ограничениями являются максимально допустимая по условиям прочности окружная скорость и частота вращения, которая для «жестких» роторов, обычно применяемых в холодильных центробежных компрессорах, не должна превышать 0,8 $n_{кр}$. Критическая частота вращения ротора $n_{кр}$, равная частоте его собственных колебаний, определяется графическим методом.

Максимально допустимая по условиям прочности окружная скорость для колес, изготовленных из легированным сталей или высокопрочных алюминиевых сплавов типа АК-6 или АК-8, лежит в пределах 300–350 м/с, а для колес, изготовленных из титановых сплавов, – 400–450 м/с.

## ЦЕЛЬ И СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Осевые силы, действующие на ротор холодильного центробежного компрессора, определяются давлениями в его проточной части и, следовательно, зависят от режимов работы. При фиксированном значении давления конденсации изменение окружной скорости на периферии рабочих колес приводит к изменению перепада энтальпии в холодильном центробежном компрессоре и, как следствие, к снижению давления кипения. Одновременно с этим будут изменяться и осевые силы, приложенные к ротору компрессора. При определении размеров разгрузочного поршня (думмиса) следует учитывать, что они должны быть приняты такими, чтобы при возможном изменении режима работы остаточная осевая сила, приложенная к упорному подшипнику, не превышала бы допустимую.

Для этого и необходимо проведение настоящего исследования, в процессе которого для возможных режимов работы холодильного центробежного компрессора будут определены не только величины осевых сил, но также и размеры думмиса.

Наибольшие из этих размеров, очевидно, и должны быть приняты конструктором при разработке проекта холодильного центробежного компрессора.

В настоящем исследовании необходимо определить для трех значений окружной скорости на периферии рабочих колес осевые силы, действующие на ротор, и размеры думмиса, обеспечивающие необходимую разгрузку этих сил.

Полученные результаты необходимо проанализировать и дать рекомендации по выбору размеров думмиса.

## ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

*Исходные данные для расчета:*

температура конденсации $t_к$;

диаметры рабочих колес $D_2$;

выходные лопаточные углы колес $\beta_{2л}$;

окружная скорость на периферии рабочих колес $u_2$;

изоэнтропный КПД компрессора $\eta_s$;

относительная ширина колеса первой ступени на выходе $\bar{b}_{2_1}$;

рабочее вещество (прил. 1–6).

Для всех вариантов рассчитывается двухступенчатый компрессор, работающий по простому циклу с однократным дросселированием, то есть без промежуточного подсоса паров рабочего вещества ко второй ступени. Следствием этого является равенство массовых производительностей обеих ступеней компрессора.

Для определения осевых сил, действующих на ротор холодильного центробежного компрессора, необходимо знать размеры ротора. Конструкция ротора для всех рассчитываемых в настоящей работе холодильных центробежных компрессоров одинакова и представлена в прил. 7.

Осевые размеры колес, думмиса, все диаметры и расстояния между опорами ротора $l_{оп}$ определяются относительно доли от наружного диаметра рабочих колес $D_2$; длины участков ротора – в долях расстояния между его опорами $l_{оп}$; объемы рабочих колес и думмиса – в долях их наружных диаметров, возведенных в третью степень:

$$\bar{d}_1 = d_1 / D_2 = 0{,}27;$$

$$\bar{d}_2 = d_2 / D_2 = 0{,}22;$$

$$\bar{d}_3 = d_3 / D_2 = 0{,}15;$$

$$d_{0_1} = 1{,}1 d_2;$$

$$d_{0_2} = 1{,}1 d_1;$$

$$d_{\text{уп}} = 1{,}15\, d_3;$$

$$\bar{l}_{\text{оп}} = l_{\text{оп}} / D_2 = 2{,}5;$$

$$l_{\text{цт}_i} = B_i / 3;$$

$$\bar{D}_{\text{лп}} = D_{\text{лп}} / D_2 = 0{,}6;$$

$$D_0 = 0{,}92 D_{\text{лп}};$$

$$\bar{B}_{\text{д}} = B_{\text{д}} / D_2 = 0{,}2;$$

$$\bar{B}_i = B_i / D_2 = 0{,}2 + \bar{b}_{2_i};$$

$$\bar{V}_{\text{д}} = V_{\text{д}} / D_2^3 = 0{,}05.$$

Масса рабочих колес и думмиса определяются по общей формуле:

$$m = V \cdot \rho,$$

где $V$ – объем, м$^3$; $\rho$ – плотность материала, кг/м$^3$: для стали $\rho$ = 7800 кг/м$^3$, для алюминиевых сплавов $\rho$ = 2700 кг/м$^3$, для титановых сплавов $\rho$ = 4320 кг/м$^3$.

Особенностью расчета является необходимость определения для различных режимов работы давления, а затем и температуры кипения рабочего вещества по известному давлению конденсации, которое для данного состояния окружающей среды будет практически постоянно [1–3].

Гидравлическими потерями на всасывании и нагнетании пренебрегают и считают, что давление торможения при всасывании в первую ступень компрессора равно давлению кипения, а давление торможения при нагнетании второй ступени – давлению конденсации [4].

Перегрев пара на всасывании в компрессор принимается одинаковым для всех режимов в пределах $\Delta t_{\text{вс}}$ = 3…5 °С, а переохлаждение жидкости при выходе из конденсатора $\Delta t_{\text{вс}}$ = 0…3 °С.

# ПРИМЕР РАСЧЕТА ОСЕВЫХ СИЛ, ДЕЙСТВУЮЩИХ НА РОТОР ХОЛОДИЛЬНОГО ЦЕНТРОБЕЖНОГО КОМПРЕССОРА

*Исходные данные:*

рабочее вещество R134a;

температура конденсации $t_к$ = 42 °С;

диаметр рабочих колес $D_2$ = 0,35 м;

выходные лопаточные углы колес $\beta_{2л} = 32^\circ$;

изоэнтропный КПД компрессора $\eta_s$ = 0,76;

перегрев пара на всасывании $\Delta t_{вс}$ = 4,0 °С;

переохлаждение при выходе из конденсатора $\Delta t_з$ = 0 °С;

окружная скорость на периферии рабочих колес $u_2$ = 150; 180; 210 м/с;

относительная ширина колеса первой ступени на выходе $\bar{b}_{2_1} = 0{,}07$;

число ступеней $Z$ = 2.

Подробный расчет осевых сил, действующих на ротор холодильного центробежного компрессора, приводится для $u_2$ = 180 м/с, расчеты при окружных скоростях $u_2$ = 150 и 210 м/с даны в прил. 1 и 8.

Газовая постоянная рабочего вещества

$$R = \frac{R_0}{\mu} = \frac{8{,}31437}{102{,}03} = 81{,}489 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}),$$

где $R_0$ – универсальная газовая постоянная; $\mu$ – молекулярная масса рабочего вещества [4]; $R_0 = 8{,}31437 \text{ кДж}/(\text{моль} \cdot \text{К})$.

Определим число лопаток рабочего колеса, коэффициент расхода, поправки на протечки и трение, эффективный угол при выходе из колеса. Эти величины определяются по заданному значению $\beta_{2л}$ (см. рис. 1) [4, 5]:

$$z_2 = 16;\ \varphi_{2r} = 0{,}18;\ 1 + \beta_{тр} + \beta_{пр} = 1{,}05;\ \beta_{2\,эф} = 32^\circ.$$

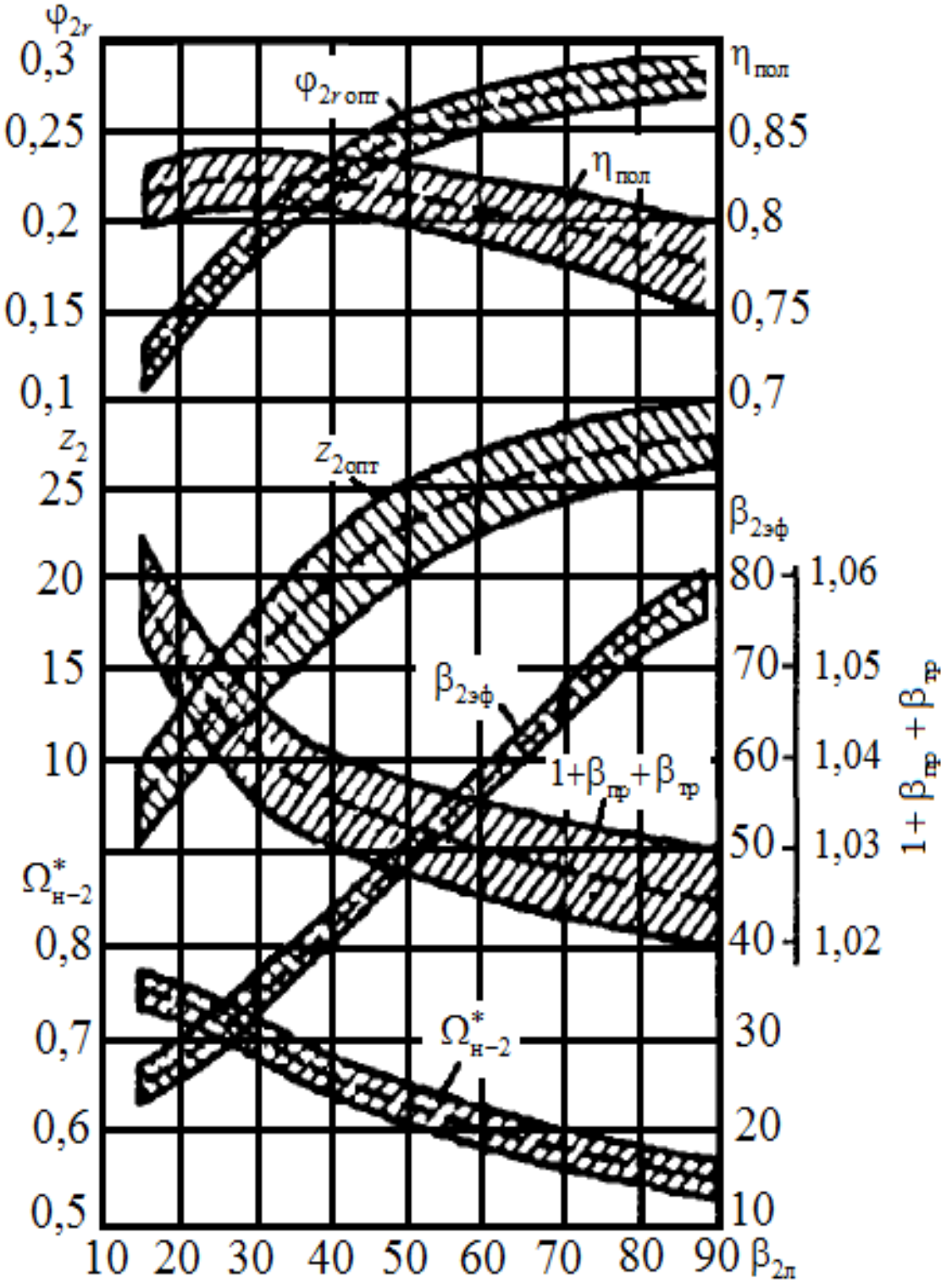



Рис. 1. Зависимость основных параметров ступеней холодильных центробежных компрессоров от угла $\beta_{2л}$

Поправка к коэффициенту теоретической работы на конечное число лопаток

$$K_z = 1 - \frac{\pi}{z_2} \sin \beta_{2л} = 1 - \frac{\pi}{16} \sin 32^\circ = 0{,}896.$$

Коэффициент теоретической работы колеса

$$\varphi_{2u} = K_z - \varphi_{2r} \operatorname{ctg} \beta_{2л} = 0{,}896 - 0{,}18 \operatorname{ctg} 32^\circ = 0{,}608.$$

Изоэнтропный перепад энтальпии в компрессоре

$$\Delta i_{н\text{-}к_s} = Z \, \varphi_{2u} \, (1 + \beta_{тр} + \beta_{пр}) \, u_2^2 \, \eta_s =$$

$$= 2 \cdot 0{,}608 \cdot 1{,}05 \cdot 180^2 \cdot 0{,}76 = 31{,}44 \text{ кДж/кг}.$$

Вписываем цикл в диаграмму (рис. 2 и прил. 1, 2). Методом последовательных приближений, зная давление конденсации и изоэнтропный перепад энтальпий $\Delta i_{н\text{-}к_s}$, а также характер изоэнтропного процесса сжатия ($s$ = const) в компрессоре, с учетом $\Delta t_{вс}$ = 4,0 °С, определяем положение точки «н» на диаграмме и следующие параметры:

температуру конденсации

$$T_к = 273 + 42 = 315 \text{ К};$$

давление конденсации [1, 3]

$$p_к = f(t_к) = 1{,}0722 \cdot 10^6 \text{ Па};$$

энтальпию пара при входе в компрессор

$$i_н = 399{,}24 \text{ кДж/кг};$$

удельный объем пара при входе в компрессор

$$\upsilon_н = 0{,}084 \text{ м}^3/\text{кг};$$

давление кипения в испарителе

$$p_0 = p_н = 0{,}2447 \cdot 10^6 \text{ Па};$$

температуру кипения в испарителе

$$T_0 = f\ \ p_0\ \ = 273 + \ -4{,}85\ \ = 268{,}15\ \text{К}.$$

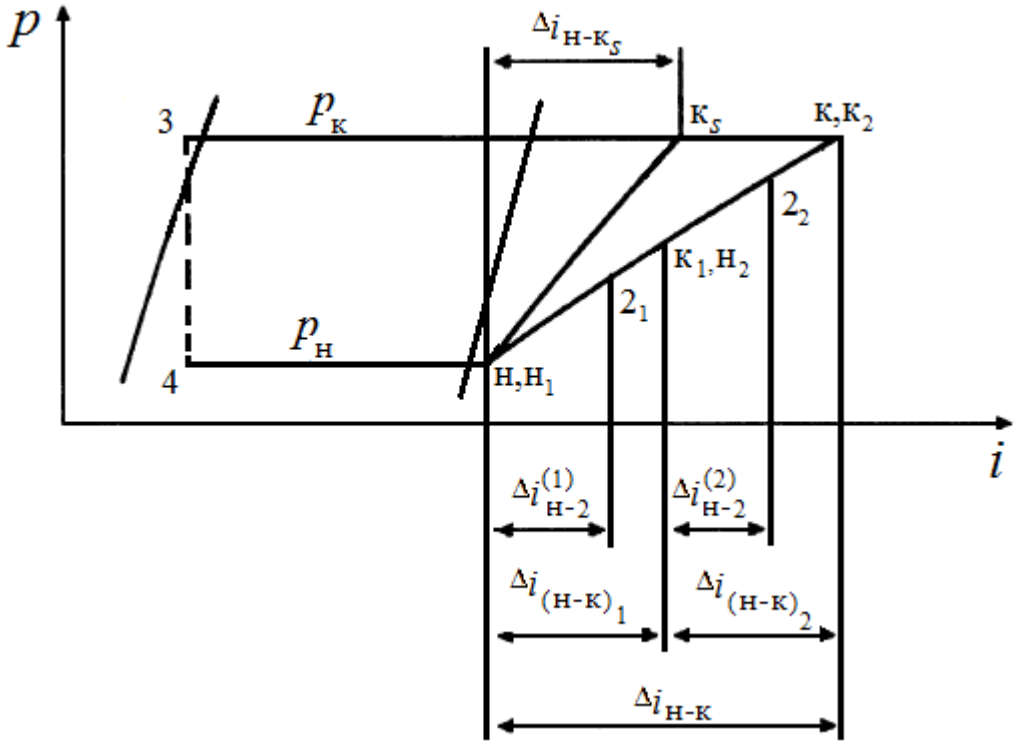



Рис. 2. Цикл холодильной машины с центробежным двухступенчатым компрессором

Скорость звука в паре при входе в компрессор

$$a_н = \sqrt{k \cdot p_н \cdot \upsilon_н} = \sqrt{1{,}07 \cdot 0{,}2447 \cdot 10^6 \cdot 0{,}084} = 148{,}3\ \ \text{м/с},$$

где $k-$ условный показатель изоэнтропы. В начале расчета задаемся ориентировочным значением $k$: для хладонов $k = 1{,}07\ldots1{,}15$; для аммиака $k = 1{,}33$. Далее значение условного показателя изоэнтропы будет скорректировано расчетом.

Принимаем для данного расчета $k = 1{,}07$.

Условное число Маха по окружной скорости

$$M_u = \frac{u_2}{a_{\text{н}}} = \frac{180}{148{,}3} = 1{,}2.$$

Частота вращения ротора компрессора

$$n = \frac{u_2}{\pi \cdot D_2} = \frac{180}{\pi \cdot 0{,}35} = 163{,}79 \text{ об/с} = 9827 \text{ об/мин}.$$

Повышение энтальпии в компрессоре

$$\Delta i_{\text{н-к}} = Z \ \varphi_{2u} \ \ 1 + \beta_{\text{тр}} + \beta_{\text{пр}} \ \ u_2^2 =$$
$$= 2 \cdot 0{,}608 \cdot 1{,}05 \cdot 180^2 = 41{,}37 \text{ кДж/кг}.$$

Определение энтальпии в конце политропного процесса сжатия:

$$i_{\text{к}} = i_{\text{н}} + \Delta i_{\text{н-к}} = 399{,}24 + 41{,}37 = 440{,}61 \text{кДж/кг}.$$

Определение удельного объема пара в конце политропного процесса сжатия:

$$\upsilon_{\text{к}} = f \ \ p_{\text{к}}, i_{\text{к}} \ \ = 0{,}02123 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Температура жидкости при выходе из конденсатора

$$T_3 = T_{\text{к}} - \Delta T_3 = 315 - 0 = 315 \text{ К}.$$

Энтальпия жидкости при выходе из конденсатора (см. прил. 3 и 6)

$$i_3 = f \ \ p_{\text{к}} \ \ = 259{,}41 \text{ кДж/кг}.$$

Удельная холодопроизводительность цикла

$$q_0 = i_{\text{н}} - i_4 = 399{,}24 - 259{,}41 = 139{,}83 \text{кДж/кг}.$$

Число изоэнтропы в процессе «н-к»

$$\sigma_s = \frac{i_к - i_н \ \cdot 10^3}{p_к \upsilon_к - p_н \upsilon_н} =$$

$$= \frac{440{,}61 - 399{,}24 \ \cdot 10^3}{1{,}0722 \cdot 10^6 \cdot 0{,}02123 - 0{,}2447 \cdot 10^6 \cdot 0{,}084} = 18{,}736.$$

Показатель изоэнтропы в процессе сжатия

$$k = \frac{\sigma_s}{\sigma_s - 1} = \frac{18{,}736}{18{,}736 - 1} = 1{,}0564.$$

Средний показатель политропы сжатия в компрессоре

$$n_с = \frac{\ln \frac{p_к}{p_н}}{\ln \frac{\upsilon_н}{\upsilon_к}} = \frac{\ln \frac{1{,}0722}{0{,}2447}}{\ln \frac{0{,}084}{0{,}02123}} = 1{,}074.$$

Политропный КПД компрессора

$$\eta_{пол} = \frac{n / \ n - 1}{k / \ k - 1} = \frac{1{,}074 / \ 1{,}074 - 1}{1{,}0564 / \ 1{,}0564 - 1} = 0{,}775.$$

Степень повышения давления в компрессоре

$$\pi_к = \frac{p_к}{p_н} = \frac{1{,}0722}{0{,}2447} = 4{,}382.$$

Уточненное значение изоэнтропного КПД компрессора

$$\eta_s = \frac{\pi_к^{1/\sigma_s} - 1}{\pi_к^{1/ \ \sigma_s \cdot \eta_{пол}} - 1} =$$

$$= \frac{4{,}382^{1/18{,}736} - 1}{4{,}382^{1/ \ 18{,}736 \cdot 0{,}775} - 1} = 0{,}766.$$

Коэффициент реактивности ступеней

$$\Omega_{\text{н}-2} = 1 - \frac{\varphi_{2u}^2 + \varphi_{2r}^2}{2 \cdot \varphi_{2u} \cdot \left(1 + \beta_{\text{тр}} + \beta_{\text{пр}}\right)} =$$

$$= 1 - \frac{0{,}608^2 + 0{,}18^2}{2 \cdot 0{,}608 \cdot 1{,}05} = 0{,}685.$$

Число политропы

$$\sigma = n / \left(n - 1\right) = 1{,}074 / \left(1{,}074 - 1\right) = 14{,}51.$$

Удельная работа ступени

$$l = \Delta i_{\text{н}_1\text{-к}_1} = \Delta i_{\text{н}_2\text{-к}_2} = \varphi_{2u} \left(1 + \beta_{\text{тр}} + \beta_{\text{пр}}\right) u_2^2 =$$

$$= 0{,}608 \cdot 1{,}05 \cdot 180^2 = 20{,}685 \,\text{кДж/кг}.$$

Повышение энтальпии в колесе

$$\Delta i_{\text{н}_1\text{-}2_1} = \Delta i_{\text{н}_2\text{-}2_2} = l \cdot \Omega_{\text{н}-2} =$$

$$= 20{,}684 \cdot 0{,}685 = 14{,}169 \,\text{кДж/кг}.$$

Давление рабочего вещества при выходе из первой ступени

$$p_{\text{к}_1} = p_{\text{н}_1} \cdot \left(1 + \frac{\Delta i_{\text{н}_1\text{-к}_1} \cdot 10^3}{\sigma_s \cdot p_{\text{н}_1} \cdot \upsilon_{\text{н}_1}}\right)^{\sigma} =$$

$$= 0{,}2447 \left(1 + \frac{20{,}685 \cdot 10^3}{18{,}736 \cdot 0{,}2447 \cdot 10^6 \cdot 0{,}084}\right)^{14{,}51} =$$

$$= 0{,}52 \text{ МПа}.$$

Давление рабочего вещества при выходе из колеса первой ступени

$$p_{2_1} = p_{\text{н}_1} \cdot \left(1 + \frac{\Delta i_{\text{н}_1\text{-}2_1} \cdot 10^3}{\sigma_s \cdot p_{\text{н}_1} \cdot \upsilon_{\text{н}_1}}\right)^{\sigma} =$$

$$= 0,2447\left(1+\frac{14,169\cdot 10^3}{18,736\cdot 0,2447\cdot 10^6\cdot 0,084}\right)^{14,51} =$$

$$=0,4133 \text{ МПа}.$$

Удельный объем рабочего вещества при выходе из колеса

$$\upsilon_{2_1}=\upsilon_{н_1}\left(\frac{p_{н_1}}{p_{2_1}}\right)^{1/n_c}=0,084\left(\frac{0,2447}{0,4133}\right)^{1/1,074}=0,0516 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Удельный объем рабочего вещества при выходе из первой ступени

$$\upsilon_{к_1}=\upsilon_{н_1}\left(\frac{p_{н_1}}{p_{к_1}}\right)^{1/n_c}=0,084\left(\frac{0,2447}{0,52}\right)^{1/1,074}=0,0416 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Массовая производительность компрессора

$$G=\frac{\pi D_2^2\tau_2\,\varphi_{2r}\,\bar{b}_2\,u_2}{\upsilon_{2_1}},$$

где $\tau_2$ – коэффициент стеснения выходного сечения колеса из-за скругления выходных кромок лопаток,

$$\tau_2=1-\frac{0,5\,\bar{\delta}_л\,z_2}{\pi\sin\beta_{2эф}},$$

где $\bar{\delta}_л=\frac{\delta_л}{D_2}=0,02\div 0,016$ – относительная толщина лопаток рабочих колес. Принимаем $\bar{\delta}_л=0,018$, тогда

$$\tau_2=1-\frac{0,5\,\bar{\delta}_л\,z_2}{\pi\sin\beta_{2эф}}=1-\frac{0,5\cdot 0,018\cdot 16}{\pi\sin 32}=0,913,$$

$$G = \frac{\pi D_2^2 \tau_2 \varphi_{2r} \bar{b}_{2_1} u_2}{\upsilon_{2_1}} =$$

$$= \frac{\pi \cdot 0{,}35^2 \cdot 0{,}913 \cdot 0{,}18 \cdot 0{,}07 \cdot 180}{0{,}0516} = 15{,}44 \text{ кг/с}.$$

Холодопроизводительность машины

$$Q_0 = G \cdot q_0 = 15{,}44 \cdot 139{,}83 = 2159 \text{ кВт}.$$

Повышение энтальпии на участке от входа в первую ступень до выхода из колеса второй ступени

$$\Delta i_{н_1\text{-}2_2} = \Delta i_{н_1\text{-}к_1} + \Delta i_{н_2\text{-}2_2} = 20{,}685 + 14{,}169 =$$

$$= 34{,}854 \text{ кДж/кг}.$$

Давление рабочего вещества при выходе из колеса второй ступени

$$p_{2_2} = p_{н_1} \cdot \left(1 + \frac{\Delta i_{н_1\text{-}2_2} \cdot 10^3}{\sigma_s \cdot p_{н_1} \cdot \upsilon_{н_1}}\right)^{\sigma} =$$

$$= 0{,}2447 \left(1 + \frac{34{,}854 \cdot 10^3}{18{,}736 \cdot 0{,}2447 \cdot 10^6 \cdot 0{,}084}\right)^{14{,}51} =$$

$$= 0{,}86 \text{ МПа}.$$

Удельный объем рабочего вещества при выходе из колеса второй ступени

$$\upsilon_{2_2} = \upsilon_{н_1} \left(p_{н_1} / p_{2_2}\right)^{1/n} = 0{,}084 \left(0{,}2447/0{,}86\right)^{1/1{,}074} = 0{,}026 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Относительная ширина при выходе из колеса второй ступени

$$\bar{b}_{2_2} = \bar{b}_{2_1} \left(\frac{\upsilon_{2_2}}{\upsilon_{2_1}}\right) = 0{,}07 \left(\frac{0{,}026}{0{,}0517}\right) = 0{,}035.$$

Основные размеры компрессора:

$$d_1 = \bar{d}_1 \cdot D_2 = 0{,}27 \cdot 0{,}35 = 0{,}095 \text{ м};$$

$$d_2 = \bar{d}_2 \cdot D_2 = 0{,}22 \cdot 0{,}35 = 0{,}077 \text{ м};$$

$$d_3 = \bar{d}_3 \cdot D_2 = 0{,}15 \cdot 0{,}35 = 0{,}053 \text{ м};$$

$$d_{0_1} = 1{,}1 d_2 = 1{,}1 \cdot 0{,}077 = 0{,}085 \text{ м};$$

$$d_{0_2} = 1{,}1 \cdot d_1 = 1{,}1 \cdot 0{,}095 = 0{,}105 \text{ м};$$

$$d_{\text{уп}} = 1{,}15 \cdot d_3 = 1{,}15 \cdot 0{,}0525 = 0{,}06 \text{ м};$$

$$l_{\text{оп}} = \bar{l}_{\text{оп}} \cdot D_2 = 2{,}5 \cdot 0{,}35 = 0{,}875 \text{ м};$$

$$\bar{B}_1 = 0{,}2 + \bar{b}_{2_1} = 0{,}2 + 0{,}07 = 0{,}27;$$

$$B_1 = \bar{B}_1 \cdot D_2 = 0{,}27 \cdot 0{,}35 = 0{,}095 \text{ м};$$

$$\bar{B}_2 = 0{,}2 + \bar{b}_{2_2} = 0{,}2 + 0{,}046 = 0{,}246 \text{ м};$$

$$B_2 = \bar{B}_2 \cdot D_2 = 0{,}246 \cdot 0{,}35 = 0{,}086 \text{ м};$$

$$l_1 = 0{,}15 \cdot l_{\text{оп}} = 0{,}15 \cdot 0{,}875 = 0{,}131 \text{ м};$$

$$l_2 = 0{,}2 \cdot l_{\text{оп}} = 0{,}2 \cdot 0{,}875 = 0{,}175 \text{ м};$$

$$l_3 = 0{,}3 \cdot l_{\text{оп}} = 0{,}3 \cdot 0{,}875 = 0{,}263 \text{ м};$$

$$l_{\text{цт}_1} = B_1 / 3 = 0{,}095 / 3 = 0{,}032 \text{ м};$$

$$l_{\text{цт}_2} = B_2 / 3 = 0{,}086 / 3 = 0{,}029 \text{ м};$$

$$d_{\text{лр}} = d_1 = 0{,}095 \text{ м};$$

$$d_{\text{вд}} = d_2 = 0{,}077 \text{ м};$$

$$D_{\text{лп}} = \bar{D}_{\text{лп}} \cdot D_2 = 0{,}6 \cdot 0{,}35 = 0{,}21 \text{ м};$$

$$D_{0_1} = D_{0_2} = 0{,}92 \cdot D_{\text{лп}} = 0{,}92 \cdot 0{,}21 = 0{,}193 \text{ м};$$

$$B_{\text{д}} = \bar{B}_{\text{д}} \cdot D_2 = 0{,}2 \cdot 0{,}35 = 0{,}07 \text{ м};$$

$$\bar{V}_1 = 0{,}02 + 0{,}05 \cdot \bar{b}_{2_1} = 0{,}02 + 0{,}05 \cdot 0{,}07 = 0{,}0235 \text{ м};$$

$$V_1 = \bar{V}_1 \cdot D_2^3 = 0{,}0235 \cdot 0{,}35^3 = 0{,}001 \text{ м}^3;$$

$$\bar{V}_2 = 0{,}02 + 0{,}05 \cdot \bar{b}_{2_2} = 0{,}02 + 0{,}05 \cdot 0{,}035 = 0{,}02175 \text{ м};$$

$$V_2 = \bar{V}_2 \cdot D_2^3 = 0{,}0218 \cdot 0{,}35^3 = 0{,}00093 \text{ м}^3.$$

Площадь входного сечения колеса первой ступени

$$F_{0_1} = \frac{\pi}{4} \left( D_{0_1}^2 - d_{0_1}^2 \right) = \frac{\pi}{4} \left( 0{,}193^2 - 0{,}085^2 \right) = 0{,}0236 \text{ м}^2.$$

Скорость и удельный объем рабочего вещества при входе в колесо первой ступени определяется решением системы уравнений, где вначале необходимо задаться значением $\upsilon_{0_1}$ и, используя метод последовательных приближений, уточнить принятое значение $\upsilon_{0_1}$, а далее скорость рабочего вещества при входе в колесо первой ступени $c_{0_1}$:

$$\begin{cases} c_{0_1} = G \, \upsilon_{0_1} / F_{0_1}; \\ p_{0_1} \upsilon_{0_1} = p_{\text{н}_1} \upsilon_{\text{н}_1} - \dfrac{c_{0_1}^2}{2\sigma_s}; \\ \upsilon_{0_1} = \upsilon_{\text{н}_1} \left( p_{\text{н}_1} \upsilon_{\text{н}_1} / p_{0_1} \upsilon_{0_1} \right)^{1/k-1}; \end{cases}$$

$$\begin{cases} c_{0_1} = 15{,}44\,\upsilon_{0_1} / 0{,}0236; \\ p_{0_1}\upsilon_{0_1} = 0{,}2447\cdot 10^6 \cdot 0{,}084 - \dfrac{c_{0_1}^2}{2\cdot 18{,}736}; \\ \upsilon_{0_1} = 0{,}084\ \ 0{,}2447\cdot 10^6 \cdot 0{,}084 \Big/\ p_{0_1}\upsilon_{0_1}\ \ \frac{1}{1{,}0564-1}; \end{cases}$$

$$\begin{cases} c_{0_1} = 59{,}67\ \text{м/с}; \\ p_{0_1}\upsilon_{0_1} = 20459{,}79\ \text{м}^2/\text{с}^2; \\ \upsilon_{0_1} = 0{,}09119\ \text{м}^3/\text{кг}. \end{cases}$$

Давление рабочего вещества при входе в колесо первой ступени

$$p_{0_1} = \frac{p_{0_1}\upsilon_{0_1}}{\upsilon_{0_1}} = \frac{20459{,}79}{0{,}09119} = 0{,}224\ \text{МПа}.$$

Осевая сила, приложенная к колесу первой ступени,

$$\Pi_1 = \frac{\pi}{4}\ \ D_{\text{лп}}^2 - d_{0_1}^2\ \ p_{0_1} -\ \ D_{\text{лп}}^2 - d_{0_1}^2\ \ p_{2_1} - u_2^2 \Big/ 8\upsilon_{2_1} \ \times$$

$$\times\left[1 - (D_2^2 + D_{\text{лп}}^2)\Big/\ 2D_2^2\ \right](D_2^2 - D_{\text{лп}}^2)\ \ - G\,c_{0_1};$$

$$\Pi_1 = \frac{\pi}{4}\ \ 0{,}21^2 - 0{,}085^2\ \ \cdot 0{,}224 -\ \ 0{,}21^2 - 0{,}085^2\ \ \cdot 0{,}4133 -$$

$$-\frac{150^2}{8\cdot 0{,}0516}\cdot\left[1 - (0{,}35^2 + 0{,}21^2)\Big/\ 2\cdot 0{,}35^2\ \right](0{,}35^2 - 0{,}21^2)\ \ -$$

$$-15{,}44\cdot 59{,}67 = -7939{,}75\ \text{Н}.$$

Площадь входного сечения колеса второй ступени

$$F_{0_2} = \frac{\pi}{4}\ D_{0_2}^2 - d_{0_2}^2\ \ = \frac{\pi}{4}\ 0{,}193^2 - 0{,}0105^2\ \ = 0{,}0206\ \text{м}^2.$$

Скорость и удельный объем рабочего вещества при входе в колесо второй ступени определяется решением системы уравнений, где вначале необходимо задаться значением $\upsilon_{0_2}$ и, используя метод последовательных приближений, уточнить принятое значение $\upsilon_{0_2}$, а далее скорость рабочего вещества при входе в колесо второй ступени $c_{0_2}$:

$$\begin{cases} c_{0_2} = G\,\upsilon_{0_2} / F_{0_2}; \\ p_{0_2}\upsilon_{0_2} = p_{н_2}\upsilon_{н_2} - c_{0_2}^2 / 2\sigma_s \ ; \\ \upsilon_{0_2} = \upsilon_{н_2} \left( p_{н_2}\upsilon_{н_2} / p_{0_2}\upsilon_{0_2} \right)^{1/k-1}; \end{cases}$$

$$\begin{cases} c_{0_2} = 15{,}44\,\upsilon_{0_2} / 0{,}0206; \\ p_{0_2}\upsilon_{0_2} = 0{,}52\cdot 10^6 \cdot 0{,}0416 - c_{0_2}^2 / 2\cdot 18{,}736 \ ; \\ \upsilon_{0_2} = 0{,}0416 \left( 0{,}52\cdot 10^6 \cdot 0{,}0416 / p_{0_2}\upsilon_{0_2} \right)^{\frac{1}{1{,}0564-1}}; \end{cases}$$

$$\begin{cases} c_{0_2} = 31{,}85 \text{ м/с}; \\ p_{0_2}\upsilon_{0_2} = 21604{,}92 \text{ м}^2/\text{с}^2; \\ \upsilon_{0_2} = 0{,}0425 \text{ м}^3/\text{кг}. \end{cases}$$

Давление рабочего вещества при входе в колесо второй ступени

$$p_{0_2} = \frac{p_{0_2}\upsilon_{0_2}}{\upsilon_{0_2}} = \frac{21604{,}92}{0{,}0425} = 0{,}508 \text{ МПа}.$$

Осевая сила, приложенная к колесу второй ступени,

$$\Pi_2 = \frac{\pi}{4}\left(D_{\text{лп}}^2 - d_{0_2}^2\right)\left(p_{0_2} - \left(D_{\text{лп}}^2 - d_{\text{вд}}^2\right)p_{2_2} - u_2^2 \Big/ 8\upsilon_{2_2}\right) \times$$

$$\times\left[1-(D_{\text{лп}}^2 + d_{\text{вд}}^2)\Big/\ 2D_2^2\ \right]\ - G\,c_{0_2};$$

$$\Pi_2 = \frac{\pi}{4}\left(0{,}21^2 - 0{,}105^2\right)\cdot 0{,}508 - \left(0{,}21^2 - 0{,}077^2\right) \times$$

$$\times\ 0{,}86 - \frac{150^2}{8\cdot 0{,}026}\left[1-(0{,}21^2 + 0{,}077^2)\Big/\ 2\cdot 0{,}35^2\ \right]\ -$$

$$-15{,}44\cdot 31{,}85 = -4098{,}28\ \text{Н}.$$

Суммарная осевая сила, приложенная к ротору от колеса,

$$\Pi = \Pi_1 + \Pi_2 = -7939{,}75 - 4098{,}28 = -12038{,}03\ \text{Н}.$$

Осевое усилие, воспринимаемое подшипником,

$$P = 0{,}007\, z_{\text{к}}\, d_{\text{уп}}^2\, \rho_{\text{м}}\, c_{\text{м}}\, \Delta T_{\text{м}},$$

где $\rho_{\text{м}}$ – плотность масла, $\rho_{\text{м}} = 0{,}87\ 10^3$ кг/м$^3$; $c_{\text{м}}$ – теплоемкость масла, $c_{\text{м}} = 1{,}89$ кДж/(кг·К); $z_{\text{к}}$ – число упорных колодок, $z_{\text{к}} = 10$; $\Delta T_{\text{м}}$ – повышение температуры масла в упорной части подшипника, $\Delta T_{\text{м}} = 15\,\text{К}$;

$$P = 0{,}007\cdot 10\cdot 0{,}06^2\cdot 0{,}87\cdot 10^3\cdot 1{,}89\cdot 10^3\cdot 15 =$$

$$= 6215{,}45\ \text{Н}.$$

Осевое усилие, которое должно быть создано думмисом,

$$\Pi_{\text{д}} = -\ P + \Pi\ = -\ 6215{,}45 - 12038{,}03\ = 5822{,}57\ \text{Н}.$$

Давление перед думмисом

$$p_{д} = p_{2_2} - \left[ \frac{u_2^2}{8\upsilon_{2_2}} \right] 1 - d_{вд}^2 / D_2^2 \; =$$

$$= 0{,}86 - \frac{150^2}{8 \cdot 0{,}026} \left( 1 - \frac{0{,}077^2}{0{,}35^2} \right) = 0{,}7118 \text{ МПа}.$$

Диаметр думмиса

$$D_{д} = d_{вд} \; 1 + 4\Pi_{д} \Big/ \left[ \pi d_{вд}^2 \;\; p_{д} - p_{н_1} \right]^{0{,}5} =$$

$$= 0{,}077 \; 1 + 4 \cdot 5822{,}57 \Big/ \left[ \pi \cdot 0{,}077^2 \;\; 0{,}7118 - 0{,}2447 \right]^{0{,}5} =$$

$$= 0{,}148 \text{ м}.$$

# СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Очков В.Ф.** Теплотехнические этюды с Excel, Mathcad и Интернет. – СПб.: БХВ-Петербург, 2015. – 336 с.

2. Теплотехнические этюды с Excel, Mathcad и Интернет / Под общ. ред. В.Ф. Очкова. – СПб.: БХВ-Петербург, 2014. – 336 с.

3. **Цветков О.Б., Лаптев Ю.А.** Таблицы свойств холодильных агентов: Учеб.-метод. пособие. – СПб.: НИУ ИТМО; ИХиБТ, 2013. – 52 с.

4. Холодильные машины / Под ред. Л.С. Тимофеевского. – СПб.: Политехника, 2006. – 941 с.

5. Тепловые и конструктивные расчеты холодильных машин / Под ред. И.А. Сакуна. – Л. : Машиностроение, 1987. – 423 с.

## Интернет-ресурсы

https://play.google.com/store/apps/details?id=de.ahlersheinel.solkane&hl=ru

http://www.chillers.ru/download/programms/CoolPackTutorial.pdf

http://twt.mpei.ac.ru/MCS/Worksheets/PTU/RefrMachine-R22.xmcd

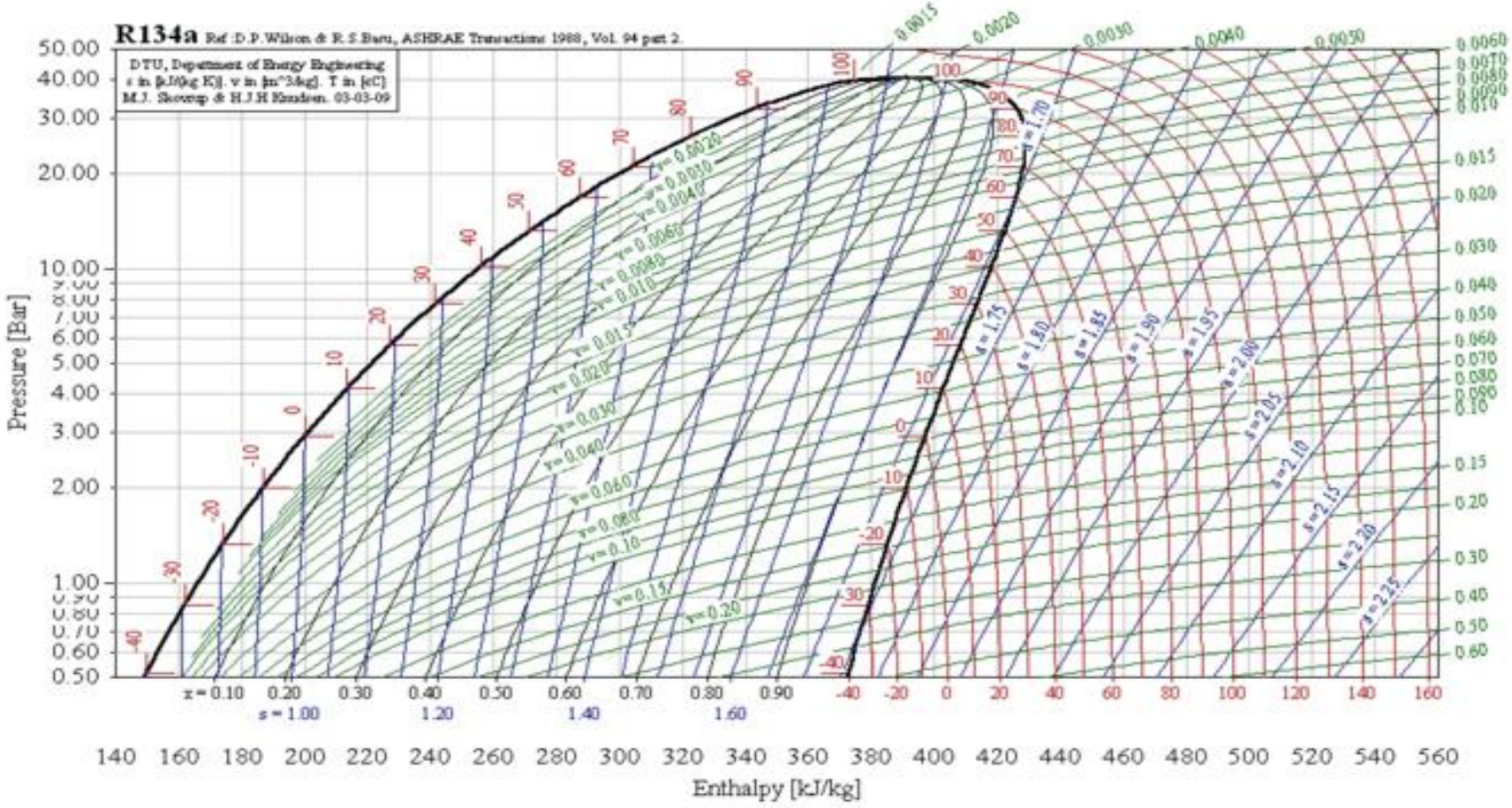
http://twt.mpei.ac.ru/MCS/Worksheets/PTU/RefrMachine-R407c.xmcd

http://twt.mpei.ac.ru/MCS/Worksheets/PTU/RefrMachine.xmcd

# ПРИЛОЖЕНИЯ

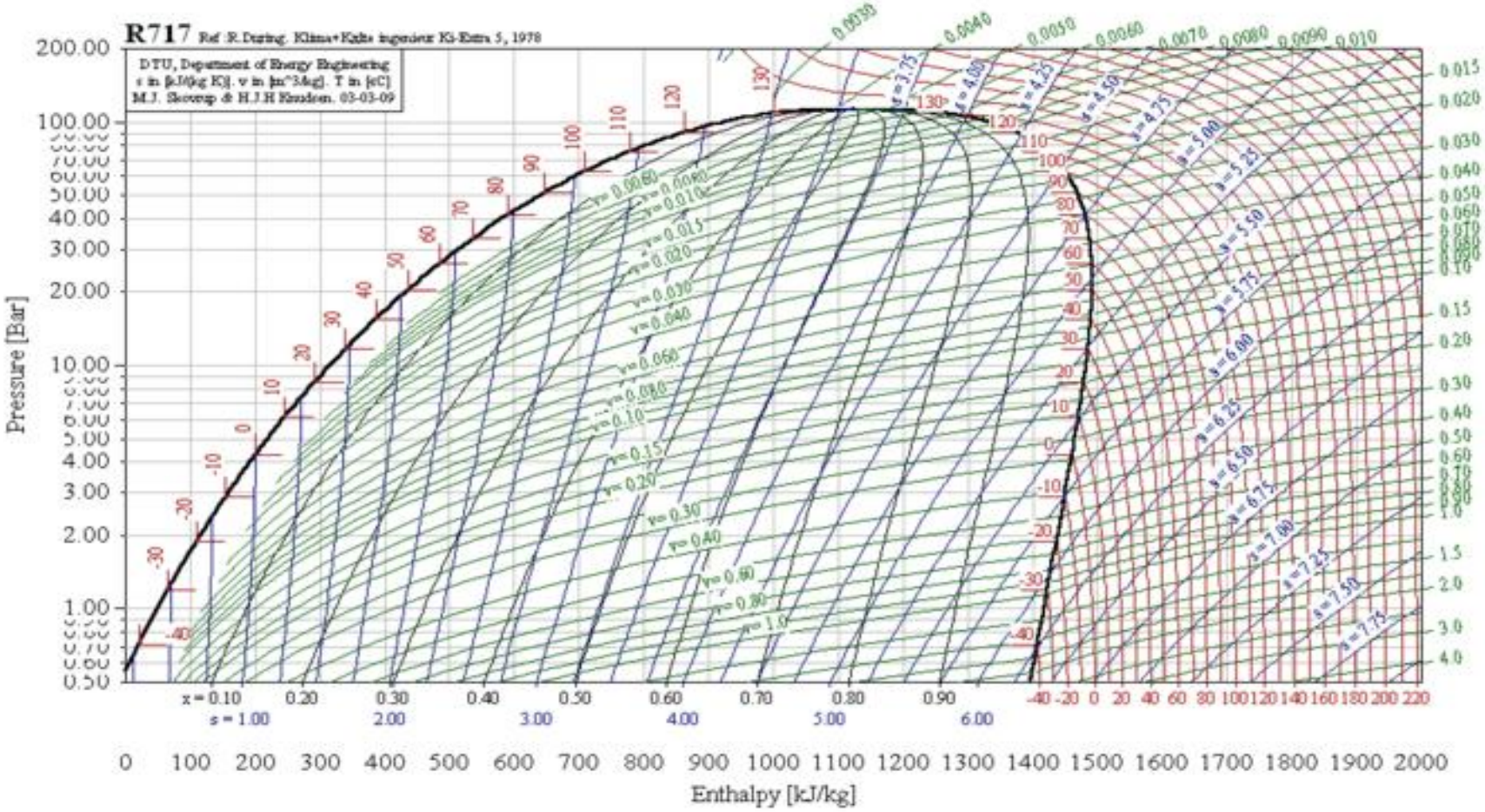
Приложение 1

## Диаграмма lg *p*–*i* R134a



Приложение 2

## Диаграмма lg *p–i* R717



Приложение 3

## Теплофизические свойства насыщенной жидкости хладагента R134a

| $t$, °C | $p$, МПа | ρ', кг/м$^3$ | $c_p$, кДж/(кг·К) | λ, Вт/(м·К) | $a\cdot10^8$, м$^2$/с | μ·10$^4$, Па·с | ν·10$^7$, м$^2$/с | σ·10$^3$, Н/м | β·10$^3$, К$^{-1}$ | Pr |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| –35 | 0,063 | 1419,6 | 1,301 | 0,1095 | 5,929 | 3,09 | 2,174 | 16,72 | – | 3,67 |
| –30 | 0,081 | 1396,9 | 1,308 | 0,1072 | 5,867 | 2,79 | 1,997 | 15,98 | 2,20 | 3,40 |
| –20 | 0,129 | 1363,2 | 1,323 | 0,1027 | 5,694 | 2,26 | 1,658 | 14,54 | 2,30 | 2,91 |
| –10 | 0,196 | 1331,3 | 1,339 | 0,0983 | 5,514 | 1,99 | 1,495 | 13,10 | 2,45 | 2,71 |
| 0 | 0,289 | 1298,7 | 1,358 | 0,0942 | 5,341 | 1,69 | 1,301 | 11,69 | 2,60 | 2,44 |
| 10 | 0,412 | 1264,6 | 1,380 | 0,0901 | 5,163 | 1,50 | 1,186 | 10,30 | 2,80 | 2,30 |
| 20 | 0,571 | 1228,4 | 1,406 | 0,0860 | 4,979 | 1,35 | 1,099 | 8,94 | 3,05 | 2,21 |
| 30 | 0,772 | 1190,1 | 1,439 | 0,0820 | 4,788 | 1,22 | 1,025 | 7,61 | 3,35 | 2,14 |
| 40 | 1,019 | 1149,0 | 1,482 | 0,0781 | 4,586 | 1,09 | 0,949 | 6,31 | 3,75 | 2,07 |
| 50 | 1,321 | 1 104,5 | 1,537 | 0,0742 | 4,371 | 0,95 | 0,860 | 5,06 | 4,25 | 1,97 |
| 60 | 1,684 | 1055,3 | 1,618 | 0,0704 | 4,123 | 0,80 | 0,758 | 3,86 | 5,00 | 1,84 |
| 70 | 2,118 | 998,8 | 1,747 | 0,0665 | 3,811 | 0,69 | 1,687 | 2,74 | 6,20 | 1,80 |

Приложение 4

## Теплофизические свойства насыщенной жидкости аммиака (R717)

| $t$, °C | $p$, МПа | ρ', кг/м$^3$ | $c_p$, кДж/(кг·К) | λ, Вт/(м·К) | $a\cdot10^6$, м$^2$/с | μ·10$^5$, Па·с | ν·10$^6$, м$^2$/с | σ·10$^2$, Н/м | Pr |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| –60 | 0,02187 | 713,9 | 4,378 | 0,600 | 0,192 | – | – | 5,14 | – |
| –50 | 0,04082 | 702,2 | 4,404 | 0,585 | 0,189 | 31,5 | 0,449 | 4,81 | 2,37 |
| –40 | 0,07169 | 690,2 | 4,434 | 0,570 | 0,186 | 27,6 | 0,400 | 4,48 | 2,15 |
| –30 | 0,1194 | 677,9 | 4,468 | 0,554 | 0,183 | 24,3 | 0,358 | 4,16 | 1,96 |
| –20 | 0,1901 | 665,1 | 4,506 | 0,538 | 0,180 | 21,6 | 0,325 | 3,84 | 1,81 |
| –10 | 0,2908 | 652,0 | 4,549 | 0,522 | 0,176 | 19,4 | 0,298 | 3,53 | 1,69 |
| 0 | 0,4296 | 638,5 | 4,599 | 0,506 | 0,172 | 17,5 | 0,274 | 3,23 | 1,59 |
| 10 | 0,6153 | 624,6 | 4,659 | 0,490 | 0,168 | 15,9 | 0,255 | 2,93 | 1,51 |
| 20 | 0,8578 | 610,2 | 4,731 | 0,472 | 0,164 | 14,5 | 0,238 | 2,64 | 1,45 |
| 30 | 1,1675 | 595,1 | 4,821 | 0,455 | 0,159 | 13,2 | 0,223 | 2,34 | 1,40 |
| 40 | 1,5556 | 579,4 | 4,931 | 0,436 | 0,153 | 12,1 | 0,209 | 2,06 | 1,37 |
| 50 | 2,0337 | 562,8 | 5,070 | 0,417 | 0,146 | 11,0 | 0,195 | 1,77 | 1,34 |

Приложение 5

## Термодинамические свойства хладагента R717 (аммиак) на линии насыщения

| $t$, °C | $p \cdot 10^{-5}$, Па | $\upsilon' \cdot 10^{3}$, м$^3$/кг | $\upsilon''$, м$^3$/кг | $i'$, кДж/кг | $i''$, кДж/кг | $r$, кДж/кг | $s'$, кДж/(кг·К) | $s''$, кДж/(кг·К) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| –65 | 0,15603 | 1,390 | 6,4641 | 209,3 | 1665,8 | 1456,5 | 0,7887 | 7,7861 |
| –60 | 0,21873 | 1,401 | 4,7103 | 331,2 | 1674,7 | 1443,5 | 0,8925 | 7,6649 |
| –55 | 0,30127 | 1,412 | 3,4916 | 253,1 | 1683,5 | 1430,3 | 0,9941 | 7,5507 |
| –50 | 0,4082 | 1,424 | 2,6288 | 275,1 | 1692,0 | 1416,8 | 1,0938 | 7,4430 |
| –45 | 0,5448 | 1,436 | 2,0072 | 297,2 | 1700,2 | 1403,0 | 1,1915 | 7,3411 |
| –40 | 0,7169 | 1,449 | 1,5530 | 319,4 | 1708,3 | 1388,9 | 1,2874 | 7,2446 |
| –39 | 0,7561 | 1,451 | 1,4775 | 323,8 | 1709,8 | 1386,0 | 1,3064 | 7,2259 |
| –38 | 0,7971 | 1,454 | 1,4063 | 328,2 | 1711,4 | 1383,2 | 1,3253 | 7,2073 |
| –37 | 0,8399 | 1,457 | 1,3392 | 332,7 | 1713,0 | 1380,3 | 1,3441 | 7,1890 |
| –36 | 0,8845 | 1,459 | 1,2760 | 337,1 | 1714,5 | 1377,4 | 1,3629 | 7,1709 |
| –35 | 0,9310 | 1,462 | 1,2162 | 341,6 | 1716,0 | 1374,4 | 1,3816 | 7,1529 |
| –34 | 0,9796 | 1,464 | 1,1598 | 346,0 | 1717,5 | 1371,5 | 1,4003 | 7,1351 |
| –33 | 1,0301 | 1,467 | 1,1066 | 350,5 | 1719,0 | 1368,5 | 1,4189 | 7,1176 |
| –32 | 1,0827 | 1,470 | 1,0562 | 355,0 | 1720,5 | 1365,6 | 1,4374 | 7,1001 |
| –31 | 1,1375 | 1,473 | 1,0085 | 359,4 | 1722,0 | 1362,6 | 1,4558 | 7,0829 |
| –30 | 1,1945 | 1,475 | 0,9634 | 363,9 | 1723,5 | 1359,6 | 1,4742 | 7,0658 |
| –29 | 1,2538 | 1,478 | 0,9208 | 368,4 | 1725,0 | 1356,6 | 1,4926 | 7,0489 |
| –28 | 1,3154 | 1,481 | 0,8803 | 372,9 | 1726,4 | 1353,5 | 1,5108 | 7,0321 |
| –27 | 1,3795 | 1,484 | 0,8418 | 377,4 | 1727,8 | 1350,5 | 1,5290 | 7,0155 |
| –26 | 1,4460 | 1,486 | 0,8058 | 381,8 | 1729,3 | 1347,4 | 1,5472 | 6,9991 |
| –25 | 1,5151 | 1,489 | 0,7710 | 386,3 | 1730,3 | 1344,4 | 1,5653 | 6,9828 |
| –24 | 1,5868 | 1,492 | 0,7386 | 390,8 | 1732,1 | 1341,2 | 1,5833 | 6,9666 |
| –23 | 1,6612 | 1,495 | 0,7072 | 395,3 | 1733,4 | 1338,1 | 1,6013 | 6,9506 |
| –22 | 1,7384 | 1,498 | 0,6780 | 399,8 | 1734,8 | 1335,0 | 1,6192 | 6,9348 |
| –21 | 1,8184 | 1,501 | 0,6498 | 404,3 | 1736,2 | 1331,9 | 1,6370 | 6,9191 |
| –20 | 1,9014 | 1,504 | 0,6230 | 408,8 | 1737,5 | 1328,7 | 1,6548 | 6,9035 |
| –19 | 1,9873 | 1,506 | 0,5977 | 413,3 | 1738,9 | 1325,5 | 1,6726 | 6,8881 |
| –18 | 2,0763 | 1,509 | 0,5737 | 417,9 | 1740,2 | 1322,3 | 1,6903 | 6,8728 |
| –17 | 2,1685 | 1,512 | 0,5510 | 422,4 | 1741,5 | 1319,1 | 1,7079 | 6,8577 |
| –16 | 2,2639 | 1,515 | 0,5291 | 426,9 | 1742,8 | 1315,9 | 1,7255 | 6,8426 |
| –15 | 2,3625 | 1,518 | 0,5081 | 431,4 | 1744,1 | 1312,6 | 1,7431 | 6,8277 |
| –14 | 2,4646 | 1,521 | 0,4883 | 436,0 | 1745,3 | 1309,3 | 1,7606 | 6,8130 |
| –13 | 2,5701 | 1,524 | 0,4695 | 440,5 | 1746,6 | 1306,1 | 1,7779 | 6,7983 |
| –12 | 2,6792 | 1,527 | 0,4515 | 455,1 | 1747,8 | 1302,8 | 1,7953 | 6,7838 |
| –11 | 2,7919 | 1,531 | 0,4342 | 449,6 | 1749,0 | 1299,4 | 1,8127 | 6,7694 |
| –10 | 2,9083 | 1,534 | 0,4179 | 454,2 | 1750,2 | 1296,1 | 1,8299 | 6,7552 |

Продолжение прил. 5

| $t$, °$C$ | $p \cdot 10^{-5}$, Па | $\upsilon' \cdot 10^3$, м$^3$/кг | $\upsilon''$, м$^3$/кг | $i'$, кДж/кг | $i''$, кДж/кг | $r$, кДж/кг | $s'$, кДж/(кг·К) | $s''$, кДж/(кг·К) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| –9 | 3,0285 | 1,537 | 0,4022 | 458,7 | 1751,4 | 1292,7 | 1,8472 | 6,7410 |
| –8 | 3,1526 | 1,540 | 0,3873 | 463,3 | 1752,6 | 1289,3 | 1,8643 | 6,7269 |
| –7 | 3,2807 | 1,543 | 0,3730 | 467,9 | 1753,8 | 1285,9 | 1,8815 | 6,7130 |
| –6 | 3,4128 | 1,546 | 0,3593 | 472,4 | 1754,9 | 1282,5 | 1,8985 | 6,6992 |
| –5 | 3,5491 | 1,550 | 0,3463 | 477,0 | 1756,1 | 1279,0 | 1,9136 | 6,6955 |
| –4 | 3,6996 | 1,553 | 0,3338 | 481,6 | 1757,2 | 1275,6 | 1,9326 | 6,6719 |
| –3 | 3,8344 | 1,556 | 0,3218 | 486,2 | 1758,3 | 1272,1 | 1,9495 | 6,6584 |
| –2 | 3,9836 | 1,559 | 0,3150 | 490,8 | 1759,4 | 1268,6 | 1,9664 | 6,6450 |
| –1 | 4,1374 | 1,563 | 0,2995 | 495,4 | 1760,5 | 1265,1 | 1,9832 | 6,6317 |
| 0 | 4,2957 | 1,566 | 0,2890 | 500,0 | 1761,5 | 1261,5 | 2,0000 | 6,6185 |
| 1 | 4,4588 | 1,569 | 0,2789 | 504,6 | 1762,6 | 1258,0 | 2,0169 | 6,6054 |
| 2 | 4,6266 | 1,573 | 0,2693 | 509,2 | 1763,6 | 1254,4 | 2,0335 | 6,5924 |
| 3 | 4,7993 | 1,576 | 0,2601 | 513,9 | 1764,6 | 1250,8 | 2,0502 | 6,5794 |
| 4 | 4,9770 | 1,580 | 0,2512 | 518,5 | 1765,6 | 1247,1 | 2,0668 | 6,5666 |
| 5 | 5,1597 | 1,583 | 0,2428 | 523,1 | 1766,6 | 1243,5 | 2,0834 | 6,5539 |
| 6 | 5,3477 | 1,587 | 0,2347 | 527,8 | 1767,5 | 1239,8 | 2,1000 | 6,5412 |
| 7 | 5,5409 | 1,590 | 0,2269 | 532,4 | 1768,5 | 1236,1 | 2,1165 | 6,5287 |
| 8 | 5,7394 | 1,594 | 0,2193 | 537,1 | 1769,4 | 1232,4 | 2,1330 | 6,5162 |
| 9 | 5,9435 | 1,597 | 0,2122 | 541,7 | 1770,3 | 1228,6 | 2,1494 | 6,5038 |
| 10 | 6,1531 | 1,601 | 0,2052 | 546,4 | 1771,2 | 1224,8 | 2,1658 | 6,4915 |
| 11 | 6,3683 | 1,605 | 0,1986 | 552,1 | 1772,1 | 1221,0 | 2,1821 | 6,4793 |
| 12 | 6,5893 | 1,608 | 0,1922 | 555,8 | 1773,2 | 1217,2 | 2,1985 | 6,4672 |
| 13 | 6,8163 | 1,612 | 0,1861 | 560,4 | 1773,8 | 1231,4 | 2,2148 | 6,4551 |
| 14 | 7,0491 | 1,616 | 0,1802 | 565,3 | 1774,6 | 1209,5 | 2,2310 | 6,4431 |
| 15 | 7,2881 | 1,619 | 0,1745 | 569,8 | 1775,4 | 1205,0 | 2,2472 | 6,4312 |
| 16 | 7,5332 | 1,623 | 0,1690 | 574,6 | 1776,2 | 1201,7 | 2,2634 | 6,4193 |
| 17 | 7,7847 | 1,627 | 0,1638 | 579,3 | 1777,0 | 1197,8 | 2,2795 | 6,4076 |
| 18 | 8,0425 | 1,631 | 0,1587 | 584,0 | 1777,8 | 1193,8 | 2,2956 | 6,3959 |
| 19 | 8,3068 | 1,635 | 0,1538 | 588,7 | 1778,5 | 1189,8 | 2,3117 | 6,3842 |
| 20 | 8,5777 | 1,639 | 0,1491 | 593,5 | 1779,2 | 1185,8 | 2,3278 | 6,3727 |
| 21 | 8,8554 | 1,643 | 0,1446 | 598,2 | 1779,9 | 1181,7 | 2,3438 | 6,3611 |
| 22 | 9,1399 | 1,647 | 0,1402 | 603,0 | 1780,6 | 1177,6 | 2,3598 | 6,3497 |
| 23 | 9,4313 | 1,651 | 0,1360 | 607,7 | 1781,3 | 1173,5 | 2,3757 | 6,3383 |
| 24 | 9,7297 | 1,655 | 0,1320 | 612,5 | 1781,9 | 1169,4 | 2,3916 | 6,3270 |
| 25 | 10,035 | 1,659 | 0,1280 | 617,3 | 1782,5 | 1165,2 | 2,4075 | 6,3157 |
| 26 | 10,348 | 1,663 | 0,1243 | 622,1 | 1783,1 | 1161,0 | 2,4234 | 6,3045 |
| 27 | 10,668 | 1,668 | 0,1206 | 626,9 | 1783,7 | 1156,8 | 2,4392 | 6,2934 |
| 28 | 10,996 | 1,672 | 0,1171 | 631,7 | 1784,2 | 1152,6 | 2,4550 | 6,2823 |

Окончание прил. 5

| $t$, °$C$ | $p \cdot 10^{-5}$, Па | $\upsilon' \cdot 10^{3}$, м$^3$/кг | $\upsilon''$, м$^3$/кг | $i'$, кДж/кг | $i''$, кДж/кг | $r$, кДж/кг | $s'$, кДж/(кг·К) | $s''$, кДж/(кг·К) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 29 | 11,331 | 1,676 | 0,1137 | 635,5 | 1784,8 | 1148,3 | 2,4708 | 6,2712 |
| 30 | 11,675 | 1,680 | 0,1104 | 641,3 | 1785,3 | 1144,0 | 2,4866 | 6,2602 |
| 31 | 12,025 | 1,685 | 0,1073 | 646,2 | 1785,8 | 1139,6 | 2,5023 | 6,2493 |
| 32 | 12,384 | 1,689 | 0,1042 | 651,0 | 1786,3 | 1135,3 | 2,5180 | 6,2384 |
| 33 | 12,751 | 1,693 | 0,1013 | 655,9 | 1786,7 | 1130,8 | 2,5337 | 6,2275 |
| 34 | 13,126 | 1,698 | 0,09842 | 660,7 | 1787,1 | 1126,4 | 2,5494 | 6,2167 |
| 35 | 13,510 | 1,702 | 0,09569 | 665,6 | 1787,6 | 1121,9 | 2,5650 | 6,2059 |
| 36 | 13,901 | 1,707 | 0,09298 | 670,5 | 1787,9 | 1117,4 | 2,5807 | 6,1952 |
| 37 | 14,302 | 1,712 | 0,09039 | 675,4 | 1788,3 | 1112,9 | 2,5963 | 6,1845 |
| 38 | 14,741 | 1,716 | 0,08790 | 680,3 | 1788,6 | 1108,3 | 2,6118 | 6,1738 |
| 39 | 15,128 | 1,721 | 0,08548 | 685,2 | 1788,9 | 1103,7 | 2,6274 | 6,1632 |
| 40 | 15,555 | 1,726 | 0,08313 | 690,2 | 1789,2 | 1099,1 | 2,6429 | 6,1526 |
| 41 | 15,991 | 1,731 | 0,08087 | 695,1 | 1789,5 | 1094,4 | 2,6585 | 6,1421 |
| 42 | 16,435 | 1,736 | 0,07868 | 700,1 | 1789,7 | 1089,7 | 2,6740 | 6,1316 |
| 43 | 16,889 | 1,741 | 0,07655 | 705,0 | 1789,9 | 1084,9 | 2,6895 | 6,1211 |
| 44 | 17,353 | 1,746 | 0,07449 | 710,0 | 1790,1 | 1080,1 | 2,7049 | 6,1106 |
| 45 | 17,826 | 1,751 | 0,07250 | 715,0 | 1790,3 | 1075,3 | 2,7204 | 6,1002 |
| 46 | 18,308 | 1,756 | 0,07057 | 720,0 | 1790,4 | 1090,4 | 2,7358 | 6,0898 |
| 47 | 18,801 | 1,761 | 0,06870 | 725,0 | 1790,5 | 1065,5 | 2,7513 | 6,0794 |
| 48 | 19,303 | 1,766 | 0,06688 | 730,1 | 1790,6 | 1060,5 | 2,7667 | 6,0690 |
| 49 | 19,815 | 1,771 | 0,06511 | 735,1 | 1790,7 | 1055,6 | 2,7821 | 6,0587 |
| 50 | 20,337 | 1,777 | 0,06341 | 740,2 | 1790,7 | 1050,5 | 2,7975 | 6,0483 |
| 51 | 20,870 | 1,782 | 0,06176 | 745,2 | 1790,7 | 1045,5 | 2,8129 | 6,0380 |
| 52 | 21,413 | 1,788 | 0,06015 | 750,3 | 1790,6 | 1040,3 | 2,8283 | 6,0277 |
| 53 | 21,966 | 1,793 | 0,05859 | 755,4 | 1790,6 | 1035,1 | 2,8436 | 6,0074 |
| 54 | 22,531 | 1,799 | 0,05707 | 760,6 | 1790,5 | 1029,9 | 2,8590 | 6,0071 |
| 55 | 23,106 | 1,804 | 0,05560 | 765,7 | 1790,4 | 1024,7 | 2,8743 | 5,9969 |
| 56 | 23,691 | 1,810 | 0,05417 | 770,8 | 1790,2 | 1019,4 | 2,8897 | 5,9866 |
| 57 | 24,288 | 1,816 | 0,05280 | 776,0 | 1790,0 | 1014,0 | 2,9050 | 5,9763 |
| 58 | 24,897 | 1,822 | 0,05144 | 781,2 | 1789,8 | 1008,6 | 2,9204 | 5,9661 |
| 59 | 25,516 | 1,828 | 0,05015 | 786,4 | 1789,5 | 1003,1 | 2,9357 | 5,9558 |
| 60 | 26,147 | 1,834 | 0,04888 | 791,6 | 1789,2 | 997,6 | 2,9510 | 5,9455 |
| 61 | 26,789 | 1,840 | 0,04764 | 796,8 | 1788,9 | 992,0 | 2,9664 | 5,9353 |
| 62 | 27,443 | 1,847 | 0,04642 | 802,1 | 1788,5 | 986,4 | 2,9817 | 5,9250 |
| 63 | 28,110 | 1,853 | 0,04527 | 807,4 | 1788,1 | 980,8 | 2,9970 | 5,9147 |
| 64 | 28,788 | 1,859 | 0,04413 | 812,6 | 1787,7 | 975,0 | 3,0124 | 5,9044 |
| 65 | 29,478 | 1,866 | 0,04303 | 818,0 | 1787,2 | 969,3 | 3,0277 | 5,8941 |

Приложение 6

## Термодинамические свойства хладагента R134a на линии насыщения

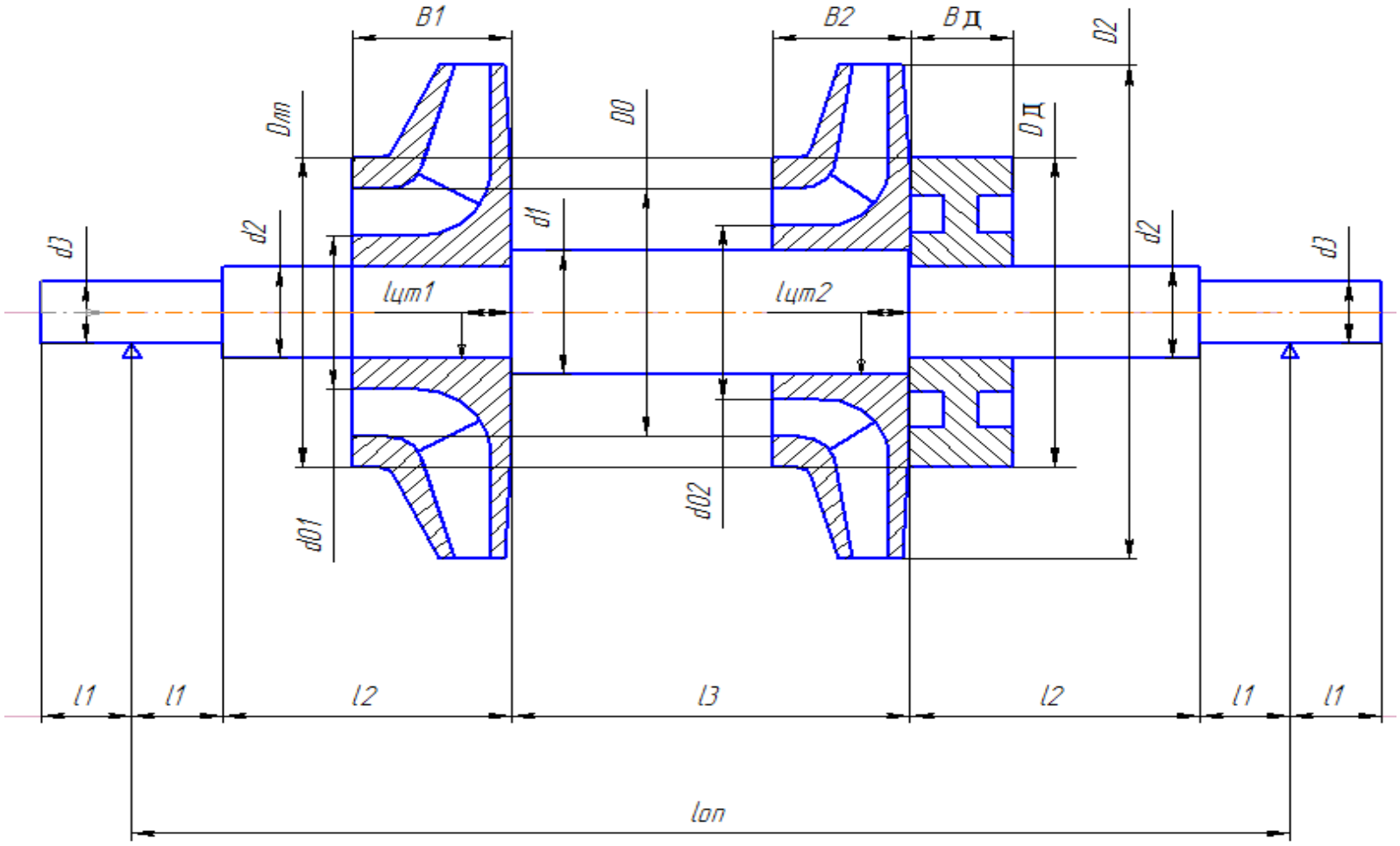
| $t$, °C | $p \cdot 10^{-6}$, Па | $\upsilon' \cdot 10^{3}$, м$^3$/кг | $\upsilon''$, м$^3$/кг | $i'$, кДж/кг | $i''$, кДж/кг | $r$, кДж/кг | $s'$, кДж/(кг·К) | $s''$, кДж/(кг·К) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| –36 | 0,06291 | 3,3590 | 1406,0 | 376,53 | 153,18 | 223,35 | 1,7588 | 0,8170 |
| –34 | 0,06951 | 3,6889 | 1400,2 | 377,79 | 155,71 | 222,08 | 1,7562 | 0,8276 |
| –32 | 0,07666 | 4,0441 | 1394,3 | 379,06 | 158,24 | 220,82 | 1,7538 | 0,8381 |
| –30 | 0,08438 | 4,4258 | 1388,4 | 380,31 | 160,79 | 219,52 | 1,7514 | 0,8486 |
| –28 | 0,09270 | 4,8356 | 1382,4 | 381,57 | 163,34 | 218,23 | 1,7492 | 0,8590 |
| –26 | 0,10167 | 5,2748 | 1376,4 | 382,82 | 165,90 | 216,92 | 1,7471 | 0,8694 |
| –24 | 0,11130 | 5,7449 | 1370,4 | 384,07 | 168,48 | 215,59 | 1,7450 | 0,8797 |
| –22 | 0,12165 | 6,2476 | 1364,3 | 385,31 | 171,05 | 214,26 | 1,7431 | 0,8900 |
| –20 | 0,13273 | 6,7845 | 1357,2 | 306,55 | 173,63 | 212,92 | 1,7413 | 0,9002 |
| –18 | 0,14460 | 7,3571 | 1352,1 | 387,78 | 176,22 | 211,56 | 1,7395 | 0,9104 |
| –16 | 0,15728 | 7,9673 | 1345,9 | 389,01 | 178,83 | 210,18 | 1,7379 | 0,9205 |
| –14 | 0,17082 | 8,6167 | 1339,7 | 390,23 | 181,44 | 208,79 | 1,7363 | 0,9306 |
| –12 | 0,18524 | 9,3074 | 1333,4 | 391,45 | 184,06 | 207,39 | 1,7347 | 0,9406 |
| –10 | 0,20060 | 10,041 | 1327,1 | 392,66 | 186,69 | 205,97 | 1,7333 | 0,9506 |
| –8 | 0,21693 | 10,819 | 1320,7 | 393,86 | 189,33 | 204,53 | 1,7319 | 0,9606 |
| –6 | 0,23428 | 11,645 | 1314,3 | 395,06 | 191,98 | 203,08 | 1,7306 | 0,9705 |
| –4 | 0,25268 | 12,521 | 1307,8 | 396,25 | 194,64 | 201,61 | 1,7294 | 0,9803 |
| –2 | 0,27217 | 13,447 | 1301,3 | 397,43 | 197,31 | 200,12 | 1,7282 | 0,9902 |
| 0 | 0,29280 | 14,428 | 1294,7 | 398,60 | 199,99 | 198,61 | 1,7270 | 1,0000 |
| 2 | 0,31462 | 15,464 | 1288,1 | 399,76 | 202,69 | 197,07 | 1,7260 | 1,0097 |
| 4 | 0,33766 | 16,560 | 1281,4 | 400,91 | 205,39 | 195,52 | 1,7249 | 1,0194 |
| 6 | 0,36198 | 17,717 | 1274,6 | 402,06 | 208,11 | 193,95 | 1,7239 | 1,0291 |
| 8 | 0,38761 | 18,937 | 1267,8 | 403,19 | 210,83 | 192,36 | 1,7230 | 1,0388 |
| 10 | 0,41461 | 20,225 | 1260,9 | 404,31 | 213,57 | 190,74 | 1,7221 | 1,0484 |
| 12 | 0,44301 | 21,583 | 1253,9 | 405,42 | 216,32 | 189,10 | 1,7212 | 1,0580 |
| 14 | 0,47288 | 23,014 | 1246,9 | 406,52 | 219,09 | 187,43 | 1,7204 | 1,0676 |
| 16 | 0,50425 | 24,521 | 1239,8 | 407,61 | 221,87 | 185,74 | 1,7195 | 1,0772 |
| 18 | 0,53718 | 26,109 | 1232,6 | 406,68 | 224,66 | 184,02 | 1,7188 | 1,0867 |
| 20 | 0,57171 | 27,780 | 1225,3 | 409,74 | 227,46 | 182,28 | 1,7180 | 1,0962 |
| 22 | 0,60789 | 29,538 | 1217,9 | 410,79 | 230,28 | 180,51 | 1,7173 | 1,1057 |
| 24 | 0,64578 | 31,389 | 1210,4 | 411,82 | 233,12 | 178,70 | 1,7165 | 1,1151 |
| 26 | 0,68543 | 33,335 | 1202,9 | 412,83 | 235,97 | 176,06 | 1,7158 | 1,1246 |
| 28 | 0,72688 | 35,382 | 1195,2 | 413,83 | 238,83 | 175,00 | 1,7151 | 1,1340 |
| 30 | 0,77020 | 37,535 | 1187,4 | 414,81 | 241,72 | 173,09 | 1,7144 | 1,1435 |

Окончание прил. 6

| $t$, °$C$ | $p \cdot 10^{-6}$, Па | $\upsilon' \cdot 10^{3}$, м$^3$/кг | $\upsilon''$, м$^3$/кг | $i'$, кДж/кг | $i''$, кДж/кг | $r$, кДж/кг | $s'$, кДж/(кг·К) | $s''$, кДж/(кг·К) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 32 | 0,81543 | 39,799 | 1179,5 | 415,78 | 244,62 | 171,16 | 1,7138 | 1,1529 |
| 34 | 0,86263 | 42,179 | 1171,5 | 416,72 | 247,54 | 169,18 | 1,7131 | 1,1623 |
| 36 | 0,91185 | 44,683 | 1163,4 | 417,64 | 250,47 | 167,17 | 1,7124 | 1,1717 |
| 38 | 0,96315 | 47,315 | 1155,1 | 418,54 | 253,43 | 165,11 | 1,7117 | 1,1810 |
| 40 | 1,0165 | 50,085 | 1146,7 | 419,42 | 256,40 | 163,02 | 1,7110 | 1,1904 |
| 42 | 1,0722 | 52,998 | 1138,1 | 420,28 | 259,40 | 160,88 | 1,7103 | 1,1998 |
| 44 | 1,1301 | 56,064 | 1129,4 | 421,11 | 262,42 | 158,69 | 1,7096 | 1,2092 |
| 46 | 1,1903 | 59,291 | 1120,5 | 421,91 | 265,46 | 156,45 | 1,7088 | 1,2186 |

Приложение 7

**Эскиз ротора холодильного центробежного компрессора**



Приложение 8

## Расчет холодильного центробежного компрессора

| Величина | Расчетная формула | Результаты расчета при окружной скорости, м/с | | |
|---|---|---|---|---|
| | | 150 | 180 | 210 |
| Газовая постоянная рабочего вещества, кДж/(кг·К) | $R = \frac{R_0}{\mu}$ | 81,489 | 81,489 | 81,489 |
| Число лопаток колеса, шт. | $z_2$ | 16 | 16 | 16 |
| Коэффициент расхода | $\varphi_{2r}$ | 0,18 | 0,18 | 0,18 |
| Поправки на протечки и трение | $1+\beta_{тр}+\beta_{пр}$ | 1,05 | 1,05 | 1,05 |
| Поправка к коэффициенту теоретической работы на конечное число лопаток | $K_z = 1-\frac{\pi}{z_2}\sin\beta_{2л}$ | 0,896 | 0,896 | 0,896 |
| Коэффициент теоретической работы | $\varphi_{2u} = K_z - \varphi_{2r}\,\mathrm{ctg}\,\beta_{2л}$ | 0,608 | 0,608 | 0,608 |
| Изоэнтропный перепад энтальпии в компрессоре, кДж/кг | $\Delta i_{н\text{-}к_s} = Z\,\varphi_{2u}\;\;1+\beta_{тр}+\beta_{пр}\;\;u_2^2\;\eta_s$ | 21,83 | 31,44 | 42,79 |
| Давление конденсации, МПа | $p_к$ | 1,0722 | 1,0722 | 1,0722 |
| Температура конденсации, °С | $T_к$ | 42 | 42 | 42 |
| Удельный объем, $м^3$/кг | $\upsilon_н$ | 0,0545 | 0,084 | 0,139 |
| Энтальпия пара при входе в компрессор, кДж/кг | $i_н$ | 406,72 | 399,24 | 390,99 |
| Давление кипения в испарителе, | $p_0$ | 0,3832 | 0,2447 | 0,1437 |
| Температура кипения в испарителе, °С | $T_0$ | 7,67 | –4,85 | –18,15 |

| Величина | Расчетная формула | Результаты расчета при окружной скорости, м/с | | |
|---|---|---|---|---|
| | | 150 | 180 | 210 |
| Принятый показатель изоэнтропы в процессе сжатия | $k$ | 1,07 | 1,07 | 1,07 |
| Скорость звука в паре при входе в компрессор, м/с | $a_{\text{н}} = \sqrt{k \cdot p_{\text{н}} \cdot \upsilon_{\text{н}}}$ | 149,49 | 148,3 | 146,19 |
| Число Маха | $M_u = u_2 / a_{\text{н}}$ | 1,0 | 1,2 | 1,4 |
| Частота вращения ротора компрессора, об/с об/мин | $n = \dfrac{u_2}{\pi \cdot D_2}$ | 136,49 (8189) | 163,79 (9827) | 191,08 (11465) |
| Повышение энтальпии в компрессоре, кДж/кг | $\Delta i_{\text{н-к}} = Z\ \varphi_{2u}\ \ 1+\beta_{\text{тр}} + \beta_{\text{пр}}\ \ u_2^2$ | 28,73 | 41,37 | 56,31 |
| Определение энтальпии в конце политропного процесса сжатия, кДж/кг | $i_{\text{к}} = i_{\text{н}} + \Delta i_{\text{н-к}}$ | 435,44 | 440,61 | 447,3 |
| Удельный объем, м$^3$/кг | $\upsilon_{\text{к}}$ | 0,02066 | 0,02123 | 0,02196 |
| Температура жидкости при выходе из конденсатора, °С | $T_3 = T_{\text{к}} - \Delta T_3$ | 42 | 42 | 42 |
| Удельная холодопроизводительность цикла, кДж/кг | $q_0 = i_{\text{н}} - i_4$ | 147,31 | 139,83 | 131,58 |
| Число изоэнтропы в процессе «н – к» | $\sigma_s = \dfrac{i_{\text{к}} - i_{\text{н}}\ \cdot 10^3}{p_{\text{к}}\upsilon_{\text{к}} - p_{\text{н}}\upsilon_{\text{н}}}$ | 22,67 | 18,736 | 15,77 |

| Величина | Расчетная формула | Результаты расчета при окружной скорости, м/с | | |
|---|---|---|---|---|
| | | 150 | 180 | 210 |
| Показатель изоэнтропы в процессе сжатия (уточненный по расчету) | $k = \frac{\sigma_s}{\sigma_s - 1}$ | 1,0461 | 1,0564 | 1,0677 |
| Средний показатель политропы сжатия в компрессоре | $n_c = \ln\left(\frac{p_к}{p_н}\right) \Big/ \ln\left(\frac{\upsilon_н}{\upsilon_к}\right)$ | 1,0607 | 1,074 | 1,089 |
| Политропный КПД компрессора | $\eta_{пол} = \frac{n/\ n-1}{k/\ k-1}$ | 0,77 | 0,775 | 0,776 |
| Число политропы | $\sigma = n/\ n-1$ | 17,47 | 14,51 | 12,24 |
| Отношение давлений в компрессоре | $\pi_к$ | 2,798 | 4,382 | 7,461 |
| Уточненное значение изоэнтропного КПД компрессора | $\eta_s = \frac{\pi_к^{1/\sigma_s} - 1}{\pi_к^{1/\ \sigma_s \cdot \eta_{пол}} - 1}$ | 0,765 | 0,766 | 0,762 |
| Коэффициент реактивности ступеней | $\Omega_{н-2} = 1 - \frac{\varphi_{2u}^2 + \varphi_{2r}^2}{2 \cdot \varphi_{2u} \cdot\ 1 + \beta_{тр} + \beta_{пр}}$ | 0,685 | 0,685 | 0,685 |
| Удельная работа ступени, кДж/кг | $l = \Delta i_{н_1\text{-}к_1} = \Delta i_{н_2\text{-}к_2} = \varphi_{2u}\ \ 1+\beta_{тр} + \beta_{пр}\ \ u_2^2$ | 14,365 | 20,685 | 28,155 |
| Повышение энтальпии в колесе, кДж/кг | $\Delta i_{н_1\text{-}2_1} = \Delta i_{н_2\text{-}2_2} = l \cdot \Omega_{н-2}$ | 9,84 | 14,169 | 19,286 |

| Величина | Расчетная формула | Результаты расчета при окружной скорости, м/с | | |
|---|---|---|---|---|
| | | 150 | 180 | 210 |
| Давление рабочего вещества при выходе из первой ступени, МПа | $p_{к_1} = p_{н_1} \cdot \left(1 + \frac{\Delta i_{н_1\text{-}к_1} \cdot 10^3}{\sigma_s \cdot p_{н_1} \cdot \upsilon_{н_1}}\right)^{\sigma}$ | 0,646 | 0,52 | 0,4098 |
| Давление рабочего вещества при выходе из колеса первой ступени, МПа | $p_{2_1} = p_{н_1} \cdot \left(1 + \frac{\Delta i_{н_1\text{-}2_1} \cdot 10^3}{\sigma_s \cdot p_{н_1} \cdot \upsilon_{н_1}}\right)^{\sigma}$ | 0,549 | 0,4133 | 0,297 |
| Удельный объем рабочего вещества при выходе из колеса, $м^3/кг$ | $\upsilon_{2_1} = \upsilon_{н_1} \left(\frac{p_{н_1}}{p_{2_1}}\right)^{1/n_c}$ | 0,0388 | 0,0516 | 0,071 |
| Удельный объем рабочего вещества при выходе из первой ступени, $м^3/кг$ | $\upsilon_{к_1} = \upsilon_{н_1} \left(\frac{p_{н_1}}{p_к}\right)^{1/n_c}$ | 0,033 | 0,0416 | 0,053 |
| Коэффициент стеснения выходного сечения колеса | $\tau_2$ | 0,913 | 0,913 | 0,913 |
| Массовая производительность компрессора, кг/с | $G = \frac{\pi D_2^2 \tau_2 \varphi_{2r} \bar{b}_2 u_2}{\upsilon_{2_1}}$ | 17,11 | 15,44 | 13,09 |
| Холодопроизводительность машины, кВт | $Q_0 = G \cdot q_0$ | 2520 | 2159 | 1722 |
| Повышение энтальпии на участке от входа в первую ступень до выхода из колеса второй ступени, кДж/кг | $\Delta i_{н_1\text{-}2_2} = \Delta i_{н_1\text{-}к_1} + \Delta i_{н_2\text{-}2_2}$ | 24,205 | 34,854 | 47,441 |

| Величина | Расчетная формула | Результаты расчета при окружной скорости, м/с | | |
|---|---|---|---|---|
| | | 150 | 180 | 210 |
| Давление рабочего вещества при выходе из колеса второй ступени, МПа | $p_{2_2} = p_{н_1} \cdot \left(1 + \frac{\Delta i_{н_1\text{-}2_2} \cdot 10^3}{\sigma_s \cdot p_{н_1} \cdot \upsilon_{н_1}}\right)^{\sigma}$ | 0,916 | 0,86 | 0,8 |
| Удельный объем рабочего вещества при выходе из колеса второй ступени, $м^3/кг$ | $\upsilon_{2_2} = \upsilon_{н_1}\left(\frac{p_{н_1}}{p_{2_2}}\right)^{1/n}$ | 0,024 | 0,026 | 0,0287 |
| Основные размеры компрессора: | | | | |
| $d$, м | $d_1 = \bar{d}_1 D_2$ | 0,095 | 0,095 | 0,095 |
| $l$, м | $d_2 = \bar{d}_2 D_2$ | 0,077 | 0,077 | 0,077 |
| $B$, м | $d_3 = \bar{d}_3 D_2$ | 0,053 | 0,053 | 0,053 |
| $D$, м | $d_{0_1} = 1{,}1 d_2$ | 0,085 | 0,085 | 0,085 |
| $V$, $м^3$ | $d_{0_2} = 1{,}1 d_1$ | 0,105 | 0,105 | 0,105 |
| | $d_{уп} = 1{,}15 d_3$ | 0,06 | 0,06 | 0,06 |
| | $l_{оп} = \bar{l}_{оп} \cdot D_2$ | 0,875 | 0,875 | 0,875 |
| | $\bar{B}_1 = 0{,}2 + \bar{b}_{2_1}$ | 0,27 | 0,27 | 0,27 |
| | $B_1 = \bar{B}_1 \cdot D_2$ | 0,095 | 0,095 | 0,095 |
| | $\bar{B}_2 = 0{,}2 + \bar{b}_{2_2}$ | 0,243 | 0,235 | 0,228 |

| Величина | Расчетная формула | Результаты расчета при окружной скорости, м/с | | |
|---|---|---|---|---|
| | | 150 | 180 | 210 |
| Основные размеры компрессора | $B_2 = \bar{B}_2 \cdot D_2$ | 0,085 | 0,082 | 0,08 |
| | $l_1 = 0{,}15 \cdot l_{\text{оп}}$ | 0,131 | 0,131 | 0,131 |
| | $l_2 = 0{,}2 \cdot l_{\text{оп}}$ | 0,175 | 0,175 | 0,175 |
| | $l_3 = 0{,}3 \cdot l_{\text{оп}}$ | 0,263 | 0,263 | 0,263 |
| | $l_{\text{цт}_1} = B_1 / 3$ | 0,032 | 0,032 | 0,032 |
| | $l_{\text{цт}_2} = B_2 / 3$ | 0,028 | 0,027 | 0,0267 |
| | $d_{\text{лр}} = d_1$ | 0,095 | 0,095 | 0,095 |
| | $d_{\text{вд}} = d_2$ | 0,077 | 0,077 | 0,077 |
| | $D_{\text{лп}} = \bar{D}_{\text{лп}} \cdot D_2$ | 0,21 | 0,21 | 0,21 |
| | $D_{0_1} = D_{0_2} = 0{,}92 \cdot D_{\text{лп}}$ | 0,193 | 0,193 | 0,193 |
| | $B_{\text{д}} = \bar{B}_{\text{д}} \cdot D_2$ | 0,07 | 0,07 | 0,07 |
| | $\bar{V}_1 = 0{,}02 + 0{,}05 \cdot \bar{b}_{2_1}$ | 0,0235 | 0,0235 | 0,0235 |
| | $V_1 = \bar{V}_1 \cdot D_2^3$ | 0,001 | 0,001 | 0,001 |
| | $\bar{V}_2 = 0{,}02 + 0{,}05 \cdot \bar{b}_{2_2}$ | 0,02215 | 0,02175 | 0,0214 |
| | $V_2 = \bar{V}_2 \cdot D_2^3$ | 0,00095 | 0,00093 | 0,00092 |

| Величина | Расчетная формула | Результаты расчета при окружной скорости, м/с | | |
|---|---|---|---|---|
| | | 150 | 180 | 210 |
| Относительная ширина при выходе из колеса второй ступени | $\bar{b}_{2_2} = \bar{b}_{2_1}\left(\frac{\upsilon_{2_2}}{\upsilon_{2_1}}\right)$ | 0,043 | 0,035 | 0,028 |
| Площадь входного сечения колеса первой ступени, м$^2$ | $F_{0_1} = \frac{\pi}{4}\ D_{0_1}^2 - d_{0_1}^2$ | 0,0236 | 0,0236 | 0,0236 |
| Скорость (м/с) и удельный объем рабочего вещества ($м^3/кг$) при входе в колесо первой ступени | $c_{0_1} = G\,\upsilon_{0_1}/F_{0_1}$ | 41,064 | 59,67 | 95,68 |
| | $p_{0_1}\upsilon_{0_1} = p_{н_1}\upsilon_{н_1} - \frac{c_{0_1}^2}{2\sigma_s}$ | 20847,21 | 20459,79 | 19684,05 |
| | $\upsilon_{0_1} = \upsilon_{н_1}\ \ p_{н_1}\upsilon_{н_1}/\ p_{0_1}\upsilon_{0_1}\ ^{1/k-1}$ | 0,05665 | 0,09119 | 0,17255 |
| Давление рабочего вещества при входе в колесо первой ступени, МПа | $p_{0_1} = \frac{p_{0_1}\upsilon_{0_1}}{\upsilon_{0_1}}$ | 0,368 | 0,224 | 0,114 |
| Осевая сила, приложенная к колесу первой ступени, Н | $\Pi_1 = \frac{\pi}{4}\ \ D_{лп}^2 - d_{0_1}^2\ \ p_{0_1} - \ D_{лп}^2 - d_{0_1}^2\ \ p_{2_1} - \frac{u_2^2}{8\upsilon_{2_1}}\cdot$ $\cdot\left[1-(D_2^2 + D_{лп}^2)/\ 2D_2^2\ \right](D_2^2 - D_{лп}^2)\ - G\,c_{0_1}$ | –7372,92 | –7939,75 | –8080,01 |

| Величина | Расчетная формула | Результаты расчета при окружной скорости, м/с | | |
|---|---|---|---|---|
| | | 150 | 180 | 210 |
| Площадь входного сечения колеса второй ступени, м$^2$ | $F_{0_2} = \frac{\pi}{4}\ D_{0_2}^2 - d_{0_2}^2$ | 0,0206 | 0,0206 | 0,0206 |
| Скорость (м/с) и удельный объем рабочего вещества ($м^3/кг$) при входе в колесо второй ступени | $c_{0_2} = G\ \upsilon_{0_2} / F_{0_2}$ | 27,89 | 31,85 | 34,53 |
| | $p_{0_2}\upsilon_{0_2} = p_{н_2}\upsilon_{н_2} - \ c_{0_2}^2 / 2\sigma_s$ | 21300,84 | 21604,92 | 21681,60 |
| | $\upsilon_{0_2} = \upsilon_{н_2}\ \ p_{н_2}\upsilon_{н_2} / \ p_{0_2}\upsilon_{0_2}^{\ 1/\ k-1}$ | 0,0336 | 0,0425 | 0,0544 |
| Давление рабочего вещества при входе в колесо второй ступени, МПа | $p_{0_2} = \frac{p_{0_2}\upsilon_{0_2}}{\upsilon_{0_2}}$ | 0,634 | 0,508 | 0,3987 |
| Осевая сила, приложенная к колесу второй ступени, Н | $\Pi_2 = \frac{\pi}{4}\ \ D_{лп}^2 - d_{0_2}^2\ \ p_{0_2} - \ D_{лп}^2 - d_{вд}^2\ \ p_{2_2} - \frac{u_2^2}{8\upsilon_{2_2}} \cdot \left[1 - (D_{лп}^2 + d_{вд}^2) / \ 2D_2^2\ \right] \Bigg\} \Bigg\} - G\,c_{0_2}$ | –3057,63 | –4098,28 | –4598,78 |
| Суммарная осевая сила, приложенная к ротору от колеса, Н | $\Pi = \Pi_1 + \Pi_2$ | –10430,55 | –12038,03 | –12678,79 |

| Величина | Расчетная формула | Результаты расчета при окружной скорости, м/с | | |
|---|---|---|---|---|
| | | 150 | 180 | 210 |
| Осевое усилие, воспринимаемое подшипником, Н | $P = 0{,}007\, z_{к}\, d_{уп}^{2}\, \rho_{м}\, c_{м}\, \Delta T_{м}$ | 6215,45 | 6215,45 | 6215,45 |
| Осевое усилие, которое должно быть создано думмисом, Н | $\Pi_{д} = -\ P + \Pi$ | 4215,1 | 5822,57 | 6463,34 |
| Давление перед думмисом, МПа | $P_{д} = p_{2_2} - \left[\dfrac{u_2^2}{8\upsilon_{2_2}}\right] 1 - d_{вд}^{2} \big/ D_2^2$ | 0,8045 | 0,7118 | 0,6172 |
| Диаметр думмиса, м | $D_{д} = d_{вд}\left\{1 + \dfrac{4\Pi_{д}}{\pi d_{вд}^{2}\ \ p_{д} - p_{н_1}}\right\}^{0,5}$ | 0,137 | 0,148 | 0,153 |

Коротков Владимир Александрович
Татаренко Юлия Валентиновна

# ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ХОЛОДИЛЬНОГО ЦЕНТРОБЕЖНОГО КОМПРЕССОРА И РАЗМЕРОВ РОТОРА НА ОСЕВЫЕ СИЛЫ, ДЕЙСТВУЮЩИЕ НА РОТОР, И ЕГО КРИТИЧЕСКУЮ ЧАСТОТУ ВРАЩЕНИЯ

## Учебно-методическое пособие

*Ответственный редактор*
Т.Г. Смирнова

*Титульный редактор*
Е.О. Трусова

*Компьютерная верстка*
Н.В. Гуральник

*Дизайн обложки*
Н.А. Потехина

*Печатается*
*в авторской редакции*

---

Подписано в печать 25.12.2015. Формат 60×84 1/16
Усл. печ. л. 2,56. Печ. л. 2,75. Уч.-изд. л. 2,5
Тираж 50 экз. Заказ № С 115

---

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

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