

МОСКОВСКИЙ ОРДЕНА ЛЕНИНА
и ОРДЕНА ОКТЯБРЬСКОЙ РЕВОЛЮЦИИ
АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ
ИМЕНИ СЕРГО ОРДЖОНИКИДЗЕ



МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
К КУРСОВОЙ РАБОТЕ
"РАСЧЕТ РЕГЕНЕРАТИВНОГО
ТЕПЛООБМЕННОГО
АППАРАТА ПВВРД"

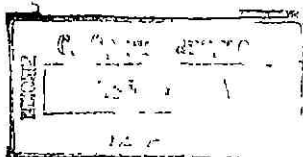
МОСКВА — 1988

МИНИСТЕРСТВО
ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ СССР

МОСКОВСКИЙ
ОРДЕНА ЛЕНИНА И ОРДЕНА ОКТЯБРЬСКОЙ РЕВОЛЮЦИИ
АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ имени СЕРГО ОРДЖОНИКИДЗЕ

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
К КУРСОВОЙ РАБОТЕ
"РАСЧЕТ РЕГЕНЕРАТИВНОГО ТЕПЛООБМЕННОГО АППАРАТА ПВВРД"

Утверждено
на заседании редсовета
30 марта 1987 г.



МОСКВА 1988

М 43.87 (075)

М 545

УДК 629.7.036+536.24] (07Г.1)

Автор-составитель Г.А. Дрейцер

Методические указания к курсовой работе "Расчет регенеративного теплообменного аппарата ПВВРД" / Авт.-сост. Г.А. Дрейцер. - М.: МАИ, 1988. - 36 с.: ил.

Изложены методики расчета трубчатого теплообменного аппарата регенеративного подогрева водорода пароводородного воздушно-реактивного двигателя. В целях интенсификации теплообмена в аппарате используются трубы с накатанными на их внешней поверхности периодически расположенными кольцевыми канавками и соответствующими им кольцевыми диафрагмами внутри труб. Представлены методики теплового и гидравлического расчета теплообменных аппаратов. Предложена новая методика конструкторского расчета теплообменников при заданном гидравлическом сопротивлении по горячей и холодной сторонам аппарата.

Методические указания предназначены для студентов авиационных вузов и факультетов.

Рецензенты: Б.Н. Юдаев, Г.Б. Петражицкий

© Московский авиационный институт, 1988 г.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Методические указания предназначены для выполнения студентами авиационных вузов и факультетов, обучающихся по специальности "Воздушно-реактивные двигатели", курсовых работ по дисциплине "Теплопередача".

Основной целью данной работы является обучение студентов современным методам теплового и гидравлического расчетов трубчатых теплообменных аппаратов, предназначенных для подогрева воздуха пароводородного воздушно-реактивного двигателя (ПВВРД). В этих аппаратах в качестве горячего теплоносителя используются продукты сгорания водорода в воздухе.

Предложенные методики и алгоритмы позволяют рассчитать поверхность теплообмена и габаритные размеры трубчатого теплообменного аппарата для заданных значений расходов теплоносителей, их температур на входе и выходе, давлений и гидравлических сопротивлений по обеим сторонам аппарата. Рассматриваемые методики могут применяться при использовании ЭВМ и САПР.

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

a, b, c - габаритные размеры аппарата; A_{12}, A_{21} - коэффициенты; C_p - теплоемкость; C_1, C_2, C_3, C_x, C'_x - константы в формулах для расчета теплообмена и сопротивления в поперечно омываемых пучках труб; D_{max} - максимальный диаметр аппарата, определяемый габаритами двигателя; D_H, D_B - наружный и внутренний диаметры труб; d_H - диаметр кольцевой канавки; d_B - диаметр кольцевой диафрагмы; F - поверхность теплообмена; g - массовая доля; G - расход; i - энтальпия; K - коэффициент теплопередачи; K_r, K_x, K_1, K_2 - коэффициенты; m_x - число ходов по холодной стороне; M - молекулярная масса; N - число труб; N_α - отношение коэффициентов теплоотдачи; p - давление; Δp - перепад давлений; r - объемная доля; R - газовая постоянная; S_r, S_x - площади проходных сечений аппарата; S_1, S_2, S - поперечный, продольный и диагональный шаги труб; T - температура; ΔT - перепад температур; t - шаг турбулизаторов; w - среднemasовая скорость; ε_2 - число рядов труб в продольном направлении; α - коэффициент теплоотдачи; λ - коэффициент теплопроводности; μ - коэффициент динамической вязкости; ξ - коэффициент гидравлического сопротивления; $\xi_{сопр г}$ - коэффициент сопротивления для поперечно омываемого пучка труб; ρ - плотность; σ - коэффициент потерь давления; $\sum \xi_i$ - сумма коэффициентов местных сопротивлений; $\varphi_{12}, \varphi_{21}$ - коэффициенты; Nu, Re, Pr - числа Нуссельта, Рейнольдса, Прандтля.

Индексы: б - большой; в - внутренний; вх - вход; вых - выход; г - горячий; гл - гладкий; з - заданный; лог - логарифмический; м - меньший; мест - местный; н - наружный; прот - противоток; п - патрубков; пов - поворот; расш - расширение; ст - стенка; суж - сужение; тр - трение; уск - ускорение; х - холодный; 1, 2 - водяной пар и воздух при расчете свойств смеси; ' - вход; " - выход.

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Расширение диапазона работы воздушно-реактивных двигателей (ВРД) в сторону обеспечения больших скоростей полета и улучшение экономических характеристик современных ВРД связано с использованием криогенных топлив, обладающих высокой теплотворной способностью, и, в частности, водорода [1, 2]. Эффективность ВРД может быть повышена за счет использования хладоресурса криогенных топлив для уменьшения относительной работы сжатия, работоспособности топлива для увеличения относительной работы расширения и регенерации тепла для увеличения располагаемой работы при одновременном повышении термического КПД цикла. Эти пути использования хладоресурса и высокой работоспособности топлива явились основой для рассмотрения ряда новых схем газотурбинных двигателей.

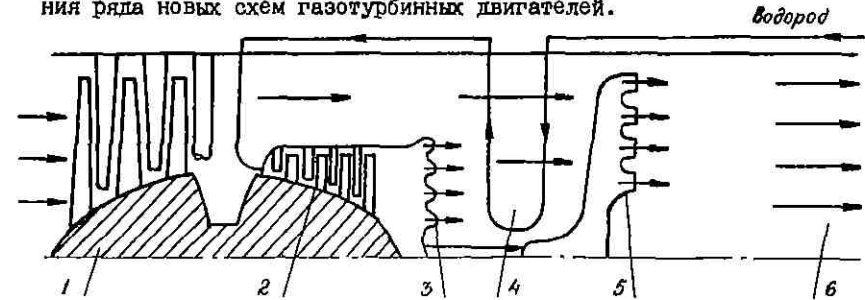


Рис. 1. Схема пароводородного ВРД:
1 - компрессор; 2 - турбина; 3 - первая камера сгорания;
4 - регенеративный подогреватель водорода; 5 - вторая камера сгорания; 6 - реактивное сопло

В качестве примера для выявления особенностей подобных двигателей рассмотрим схему пароводородного воздушно-реактивного двигателя (ПВВРД) (рис. 1). Воздух после диффузора и компрессора поступает в первую камеру сгорания, куда также подается подогретый водород. После камеры сгорания продукты горения водорода проходят через регенеративный подогреватель и поступают во вторую камеру

сгорания, а затем в реактивное сопло. Водород, пройдя каналы охлаждения стенок сопла и камер сгорания, поступает в регенеративный теплообменник, а затем в пароводородную турбину. Из турбины одна часть водорода поступает в первую камеру сгорания, а другая — во вторую.

Преимуществами данной схемы являются пониженное давление газа на турбине, возможность уменьшения степени сжатия в компрессоре до $\pi_K^* = 3,5 \dots 5$ и сокращения числа ступеней компрессора.

В пароводородном ВРД используется чрезвычайно высокая энергоемкость подогретого водорода (газовая постоянная водорода $R = 4,16 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$, теплоемкость $C_p = 14,63 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$). Теплопроводная способность водорода в 2,8 раза больше, чем керосина, однако плотность в 11,5 раза меньше. Характеристики горения жидкого водорода существенно превосходят основные характеристики горения жидких керосина и метана: максимальная нормальная скорость распространения пламени при горении водорода в 8-9 раз выше соответствующих значений для керосина и метана; водород имеет более широкие пределы и низкое минимальное давление распространения пламени.

При переходе от керосина к водороду удельные расходы топлива уменьшаются примерно в 2,8 раза, но одновременно в 4,15 раза увеличивается емкость баков (из-за снижения плотности) при равноценных энергетических запасах.

Регенеративный теплообменник является одним из основных элементов данного двигателя и по сравнению с другими элементами составляет значительную долю по массе и объему.

Задачей настоящей работы является расчет регенеративного теплообменника, в котором сжатый водород подогревается смесью продуктов сгорания водорода в воздухе.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ РАСЧЕТА

Теплообменный аппарат — трубчатый, многоходовой по водороду внутри труб и одноходовой по горячему газу в межтрубном пространстве, омывающему пучок труб поперечно. Пучок труб — шахматный. Нагреваемый водород подается внутрь труб, нагревающий горячий газ — снаружи труб.

Схема теплообменника представлена на рис. 2. Теплообменник размещают в трубе с заданным диаметром D_{max} , определяемым габаритами двигателя. Так как площадь поперечного сечения теплообменника

по горячей стороне, как правило, больше площади поперечного сечения двигателя, теплообменник размещают по конической поверхности.

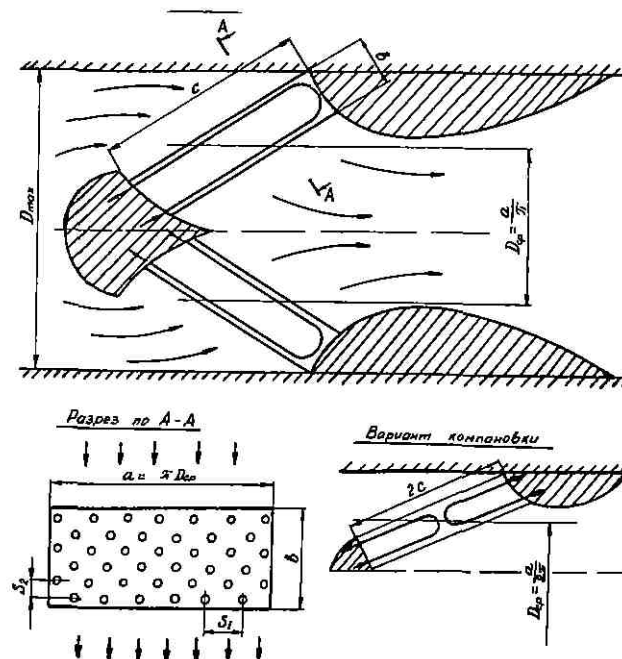


Рис. 2. Схема регенеративного теплообменника

Заданы: наружный диаметр труб D_H , внутренний диаметр труб D_B , продольный шаг труб в пучке S_1 , поперечный шаг S_2 , число ходов по холодной стороне m_x , расход горячего газа G_r , состав горячего газа (смеси паров воды и воздуха) — массовые доли паров воды g_1 и воздуха g_2 , температура горячего газа на входе T_r' , давление горячего газа на входе p_r' , коэффициент потерь давления по горячей стороне b_r , расход водорода G_x , температура водорода на входе T_x' , температура водорода на выходе T_x'' , давление водорода на входе p_x' , допустимые потери давления по водороду Δp_x .

Определить: коэффициент теплопередачи, поверхность теплообмена, площади проходных сечений по горячей и холодной сторонам, габаритные размеры теплообменника при использовании труб с турбулизаторами.

Вычертить эскиз теплообменника, собранного из труб с турбулизаторами.

I. МЕТОДИКА РАСЧЕТА ТЕПЛООБМЕННОГО АППАРАТА ПРИ ЗАДАННОМ ГИДРАВЛИЧЕСКОМ СОПРОТИВЛЕНИИ

Процесс теплопередачи в теплообменных аппаратах связан с гидравлическими потерями, т.е. с затратами мощности на прокачку теплоносителей через теплообменные аппараты. Уменьшение гидравлических потерь приводит к снижению скорости течения, росту проходных сечений, габаритных размеров и массы теплообменных аппаратов. Обычно в инженерной практике при прямом расчете теплообменника определяются при заданных скоростях его геометрические характеристики и гидравлическое сопротивление. Для обеспечения заданного гидравлического сопротивления расчеты ведутся путем последовательных приближений.

В данной работе используется предложенная в [3] методика расчета трубчатого теплообменного аппарата при заданном гидравлическом сопротивлении по горячему газу (по межтрубному пространству). Использование этой методики позволяет значительно сократить объем вычислительных работ. Для рассматриваемого аппарата основным требованием является обеспечение заданных потерь давления по горячей стороне. Обеспечить заданные потери давления по холодной стороне гораздо легче, так как расход водорода значительно меньше расхода горячего газа, а давление водорода существенно выше.

Вначале определяются тепловая мощность аппарата Q , средне-логарифмический температурный напор $\Delta \bar{T}_{\text{лог}}$, средняя температура горячего \bar{T}_r и холодного \bar{T}_x теплоносителей, средняя плотность теплоносителей $\bar{\rho}_r$ и $\bar{\rho}_x$ (соответственно по $\bar{\rho}_r = \rho_r' - \Delta p_r / 2$, \bar{T}_r и $\bar{\rho}_x = \rho_x' - \Delta p_x / 2$, \bar{T}_x).

В общем виде для поперечно омываемых газом шахматных пучков труб формулу для теплоотдачи можно представить таким образом:

$$Nu_r = C_1 Re_r^{0,6} \quad (1)$$

или

$$\alpha_r = \frac{C_1 \lambda_r Re_r^{0,6}}{D_H} = K_r Re_r^{0,6} \quad \text{Вт / (м}^2 \cdot \text{К)}, \quad (2)$$

где α_r - средний коэффициент теплоотдачи в межтрубном пространстве (по горячей стороне);

$$C_1 = 0,334 C_2 Pr_r^{0,35} \left(\frac{S_1 - D_H}{S - D_H} \right)^{0,2} \quad \text{при} \quad \frac{S_1 - D_H}{S - D_H} \geq 0,7, \quad (3)$$

$$C_1 = 0,305 C_2 Pr_r^{0,35} \quad \text{при} \quad \frac{S_1 - D_H}{S - D_H} < 0,7; \quad (4)$$

Re_r - число Рейнольдса в межтрубном пространстве:

$$Re_r = \bar{\rho}_r \bar{w}_r D_H / \mu_r; \quad (5)$$

C_2 - поправка на число рядов \mathcal{Z}_2 в продольном направлении; при $\mathcal{Z}_2 > 10$ имеем $C_2 \approx 1$; $S = \sqrt{0,25 S_1^2 + S_2^2}$ - диагональный шаг труб; S_2 - продольный шаг труб; S_1 - поперечный шаг труб; \bar{w}_r - средняя скорость потока в узком сечении пучка; D_H - наружный диаметр труб; λ_r - коэффициент теплопроводности газа при средней температуре \bar{T}_r ; μ_r - коэффициент динамической вязкости газа при \bar{T}_r и $Pr_r = \frac{c_p (\rho_r' - \Delta p_r)}{2}$; Pr_r - число Прандтля при \bar{T}_r .

Гидравлическое сопротивление поперечно омываемых шахматных пучков составляет [4]

$$\Delta p_r = C_2 C_3 (\mathcal{Z}_2 + 1) Re_r^{-0,27} \bar{\rho}_r \bar{w}_r^2 \quad \text{Н/м}^2, \quad (6)$$

где C_2 - коэффициент, зависящий от S_1 / D_H (рис. 3); C_3 - коэффициент, зависящий от S / D_H

(рис. 3); \mathcal{Z}_2 - число рядов в продольном направлении; $\bar{\rho}_r$ - плотность газа при средней температуре \bar{T}_r , или

$$\rho_{\text{соп}r} = \frac{\Delta p_r}{\bar{\rho}_r \bar{w}_r^2 / 2} = 2 C_2 C_3 (\mathcal{Z}_2 + 1) Re_r^{-0,27} \quad (7)$$

Число рядов в продольном направлении \mathcal{Z}_2 неизвестно. Для его определения воспользуемся следующими соотношениями. Обозначим габаритные размеры теплообменника через a , b и c (рис. 2). Тогда поверхность теплообмена, полученная по наружному диаметру труб, будет

$$F = \frac{a b c \pi D_H}{S_1 S_2}, \quad (8)$$

а площадь проходного сечения межтрубного пространства

$$S_r = a c \frac{S_1 - D_H}{S_1}, \quad (9)$$

откуда длина теплообменника по ходу газа в межтрубном пространстве

$$b = \frac{F (S_1 - D_H) S_2}{S_r \pi D_H} \quad (10)$$

Так как

$$S_r = \frac{Q}{c_p (\bar{T}_r' - \bar{T}_r'') \bar{w}_r \bar{\rho}_r}, \quad (11)$$

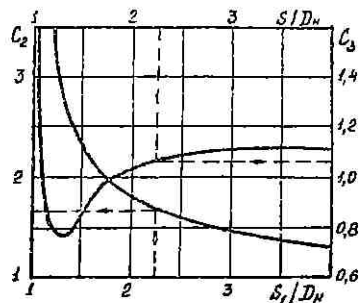


Рис. 3. Зависимости C_2 от S_1 / D_H и C_3 от S_1 / D_H для поперечно омываемых шахматных пучков труб

$$F = \frac{Q}{\alpha_r \Delta T_r}, \quad (12)$$

то

$$b = \frac{\bar{w}_r \bar{\rho}_r c_{pr} (S_1 - D_H) S_2}{\alpha_r \pi D_H} \frac{T_r' - T_r''}{\Delta T_r}. \quad (13)$$

Здесь c_{pr} - средняя теплоемкость газа по горячей стороне; Q - тепловая мощность аппарата; ΔT_r - средний температурный напор в межтрубном пространстве.

С учетом (5) получаем

$$b = \frac{Re_r \mu_r c_{pr} (S_1 - D_H) S_2}{\alpha_r \pi D_H} \frac{T_r' - T_r''}{\Delta T_r}. \quad (14)$$

Определяя α_r по (2) и заменяя $\rho_r = \frac{\mu_r c_{pr}}{\lambda_r}$, получаем

$$b = \frac{Re_r^{0,4} Pr_r (S_1 - D_H) S_2}{C_1 \pi D_H} \frac{T_r' - T_r''}{\Delta T_r}. \quad (15)$$

Так как

$$\alpha_2 = \frac{b}{S_2} = \frac{Re_r^{0,4} Pr_r (S_1 - D_H)}{C_1 \pi D_H} \frac{T_r' - T_r''}{\Delta T_r}, \quad (16)$$

то

$$\xi_{сопрг} = \frac{2C_2 C_3 C_x' Re_r^{0,13} Pr_r (S_1 - D_H)}{C_1 \pi D_H} \frac{T_r' - T_r''}{\Delta T_r}, \quad (17)$$

где

$$C_x' = \frac{\alpha_2 + 1}{\alpha_2} = 1 + \frac{S_2}{b}.$$

В предварительном расчете можно принять $C_x' \cong 1$. Число Re_r в межтрубном пространстве обычно изменяется в пределах $Re_r = 4000 \dots 10000$. Тогда $Re_r^{0,13} = 2,94 \dots 3,32$, т.е. изменяется незначительно. Примем для дальнейших расчетов $Re_r^{0,13} \approx 3$. Тогда

$$\xi_{сопрг} = \frac{6C_2 C_3 (S_1 - D_H) Pr_r}{C_1 \pi D_H} \frac{T_r' - T_r''}{\Delta T_r} = \frac{K_1}{\Delta T_r}. \quad (18)$$

Для определения $\xi_{сопрг}$ известны все величины, кроме ΔT_r . Найти ΔT_r можно, задавшись соотношением $N_{\alpha} = \alpha_x / \alpha_r$ (α_x - коэффициент теплоотдачи по холодной стороне). В рассматриваемом случае для гладких труб $\alpha_x / \alpha_r = 1,5 \dots 2$, а для труб с турбулизаторами $\alpha_x / \alpha_r = 3 \dots 6$. Тогда $\Delta T_r' / \Delta T_x = 1,5 \dots 6$ (ΔT_x - напор по холодной стороне).

Пренебрегая температурным напором в стенке труб, получаем

$$\Delta T_r = \frac{\Delta T_{лог} N_{\alpha}}{N_{\alpha} + D_H / D_B}. \quad (19)$$

Используя (19), определяем $\xi_{сопрг}$ по (18), а затем находим число Рейнольдса в межтрубном пространстве по соотношению, полученному в [3]:

$$Re_r^2 = \frac{4(1 - \beta_r^2) \bar{\rho}_r^2 D_H^2 R_r \bar{T}_r}{(1 + \beta_r)^2 \mu_r^2 \left[\xi_{сопрг} + \frac{2(T_r'' - T_r')}{\bar{T}_r} + 4 \frac{1 - \beta_r}{1 + \beta_r} \right]}, \quad (20)$$

где $\beta_r = 1 - \frac{\Delta p_r}{p_r}$; R_r - газовая постоянная.

Для точного определения величины N_{α} , удовлетворяющей заданным потерям давления по горячей и холодной сторонам теплообменника, нужно решить уравнение [3]

$$\frac{1}{N_{\alpha}} = \frac{K_r \left\{ \frac{4(i - \beta_r^2) \bar{\rho}_r^2 D_H^2 R_r \bar{T}_r}{(1 + \beta_r)^2 \mu_r^2 \left[\frac{K_2}{\Delta T_{лог} N_{\alpha}} \left(N_{\alpha} + \frac{D_H}{D_B} \right) + 2 \frac{T_r'' - T_r'}{\bar{T}_r} + 4 \frac{1 - \beta_r}{1 + \beta_r} \right]} \right\}^{0,3}}{K_x \left\{ \frac{2 \Delta \rho_x \bar{\rho}_x D_B^2}{\mu_x^2 \left[\frac{K_2 D_B}{\Delta T_{лог} D_H} \left(N_{\alpha} + \frac{D_H}{D_B} \right) + \sum \xi_{ix} + 2 \bar{\rho}_x \left(\frac{1}{\rho_x'} - \frac{1}{\rho_x''} \right) \right]} \right\}^{0,4}}, \quad (21)$$

где K_r находится из (2), K_2 - из (18), K_x - из уравнения

$$\alpha_x = \frac{0,023 Re_x^{0,8} Pr_x^{0,4} \lambda_x}{D_B} = K_x Re_x^{0,8}, \quad (22)$$

K_2 - из уравнения

$$\xi_{ix} \frac{C}{D_B} m_x = \frac{1,75 (T_x'' - T_x')}{\Delta T_x} = \frac{K_2}{\Delta T_x}; \quad (23)$$

Re_x, Pr_x - числа Рейнольдса и Прандтля по холодной стороне; $\sum \xi_{ix}$ - сумма коэффициентов местных сопротивлений по холодной стороне (методика определения этих коэффициентов представлена в разд. 3); $\bar{\rho}_x, \mu_x, \lambda_x$ - плотность, коэффициенты динамической вязкости и теплопроводности водорода при средних значениях давления $\bar{\rho}_x = \rho_x' - \Delta \rho_x / 2$ и температуры $\bar{T}_x = T_r - \Delta T_{лог}$; ρ_x', ρ_x'' - плотность водорода на входе и выходе из аппарата.

Уравнение (21) можно сравнительно просто решить графически. Знание N_{α} позволяет найти Re_r, Re_x , а затем и площади проходных сечений в межтрубном пространстве и внутри труб, число труб теплообменника, коэффициенты теплоотдачи, коэффициент теплопередачи, поверхность теплопередачи и габаритные размеры теплообменника.

Таким образом, предлагаемая методика позволяет непосредственно определять размеры трубчатого теплообменника с поперечным размещением межтрубного пространства при заданных потерях давления в межтрубном пространстве и внутри труб.

2. ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ ТЕЧЕНИИ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В КАНАЛАХ

К теплообменным аппаратам двигателей ЛА предъявляются повышенные требования по компактности, габаритам и массе. При заданных значениях тепловой мощности, расходов теплоносителей и гидравлических сопротивлений уменьшить габариты и массу аппаратов можно за счет увеличения коэффициентов теплоотдачи или более плотной компоновки (уменьшения диаметра труб или расстояния между ними). Уменьшение диаметра труб и расстояния между ними ограничивается технологическими требованиями, поэтому практически остается один путь – уменьшение габаритных размеров и массы, т.е. интенсификация теплоотдачи.

Наиболее реальным и доступным путем интенсификации теплоотдачи является искусственная турбулиизация потока [5]. Интенсификация теплообмена, сопровождаемая умеренным ростом гидравлических потерь, позволяет снизить габариты и массу теплообменников. Как показано в [5], наилучшие результаты дают методы интенсификации теплообмена, учитывающие структуру турбулентного течения в каналах.

При турбулентном режиме течения в каналах основное термическое сопротивление теплообмену между стенкой и потоком сосредоточено в узком пристеночном слое толщиной порядка 0,05...0,1 от радиуса трубы. Именно в этом слое целесообразно в целях интенсификации теплообмена увеличивать турбулентный перенос тепла. Эффективным путем турбулиизации потока является создание в пристенной области отрывных зон. Наилучшие результаты достигаются при дискретной турбулиизации потока на стенках каналов, при этом источниками турбулентных вихрей должны быть плавно очерченные выступы или канавки.

Представленные в [5] результаты исследований позволили научно обосновать рациональный выбор метода интенсификации теплообмена в каналах любого поперечного сечения и разработать способы его реализации. Для трубчатых теплообменных аппаратов можно предложить следующий метод интенсификации теплообмена. На наружной поверхности теплообменных труб накаткой наносятся периодически расположенные кольцевые канавки (рис. 4). При этом на внутренней поверхности труб образуются кольцевые диафрагмы с плавной конфигурацией. Такие диафрагмы и кольцевые канавки турбулизируют поток в пристенном слое и обеспечивают интенсификацию теплообмена как снаружи, так и внутри труб. Наружный диаметр труб не увеличивается, что позволяет использовать трубы в тесных пучках и не менять существующей

технологии сборки трубчатых теплообменных аппаратов. Данные поверхности теплообмена применимы для трубчатых теплообменных аппаратов, работающих на газах и жидкостях, а также при кипении и конденсации теплоносителей.

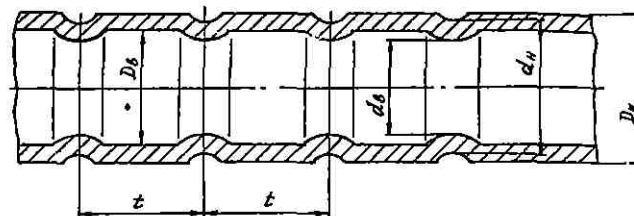


Рис. 4. Труба с кольцевыми турбулизаторами

Увеличение коэффициентов теплоотдачи и гидравлического сопротивления в трубах с кольцевыми диафрагмами по сравнению с гладкими трубами удобно учитывать с помощью отношений $Nu/Nu_{г\lambda}$ и $\xi/\xi_{г\lambda}$, где индекс "г\lambda" относится к гладкой трубе. Отношения $Nu/Nu_{г\lambda}$ и $\xi/\xi_{г\lambda}$ зависят от числа Re , отношения диаметра диафрагмы к внутреннему диаметру трубы $d_д/d_в$ (рис. 4), относительного шага размещения диафрагмы $t/D_в$. В области развитого турбулентного течения наиболее эффективные результаты достигаются при невысоких диафрагмах ($d_д/d_в \geq 0,93$) и небольших шагах ($t/D_в = 0,25...0,5$). При расчете коэффициент теплоотдачи в трубах с турбулизаторами относится к поверхности гладкой трубы.

В рассматриваемом теплообменном аппарате водород, протекающий внутри труб, нагревается. Опытные данные по средней теплоотдаче обобщаются следующими зависимостями:

$$\left(\frac{Nu}{Nu_{г\lambda}}\right)_x = \left[1 + \frac{19 Re_x - 4,6}{35}\right] \left\{3 - 2 \exp\left[\frac{-18,2(1 - d_д/D_в)^{1,13}}{(t/D_в)^{0,322}}\right]\right\}, \quad (24)$$

справедливой для $d_д/D_в = 0,88...0,98$, $t/D_в = 0,25...0,8$, $Re_x = 10^4 \dots 4 \cdot 10^5$;

$$\left(\frac{Nu}{Nu_{г\lambda}}\right)_x = \left[1 + \frac{19 Re_x - 4,6}{35}\right] \left[\left(3,33 \frac{t}{D_в} - 16,33\right) \frac{d_д}{D_в} + (17,33 - 3,33 \frac{t}{D_в})\right], \quad (25)$$

справедливой для $d_д/D_в = 0,88...0,98$, $t/D_в = 0,8...2,5$, $Re_x = 10^4 \dots 4 \cdot 10^5$.

В обеих формулах числа Re_x и Nu_x берутся по среднemasовой температуре потока.

Отношения $Nu/Nu_{гр}$ и $\xi/\xi_{гр}$ в зависимости от Re и d/D_B , полученные в трубах на воздухе

d/D_B	$Re=10^4$		$Re=2 \cdot 10^4$		$Re=4 \cdot 10^4$		$Re=10^5$		$Re=2 \cdot 10^5$		$Re=4 \cdot 10^5$	
	$Nu/Nu_{гр}$	$\xi/\xi_{гр}$	$Nu/Nu_{гр}$	$\xi/\xi_{гр}$	$Nu/Nu_{гр}$	$\xi/\xi_{гр}$	$Nu/Nu_{гр}$	$\xi/\xi_{гр}$	$Nu/Nu_{гр}$	$\xi/\xi_{гр}$	$Nu/Nu_{гр}$	$\xi/\xi_{гр}$
	$t/D_B=0,25$											
0,99	1,28	1,45	1,30	1,35	1,32	1,32	1,35	1,20	1,37	1,20	1,34	1,17
0,98	1,55	1,88	1,55	1,72	1,60	1,72	1,62	1,62	1,70	1,60	1,75	1,50
0,97	1,80	2,35	1,80	2,20	1,85	2,20	1,88	2,15	1,95	2,08	2,05	2,05
0,96	1,94	2,84	2,01	2,76	2,08	2,74	2,10	2,68	2,15	2,74	2,25	2,70
0,95	2,14	3,28	2,20	3,30	2,28	3,35	2,28	3,32	2,37	3,40	2,45	3,50
0,94	2,31	3,89	2,35	3,85	2,43	4,10	2,43	4,15	2,56	4,20	2,63	4,45
0,93	2,43	4,20	2,50	4,36	2,58	4,86	2,58	5,20	2,68	5,15	2,79	5,45
0,92	2,54	4,70	2,64	5,03	2,68	5,66	2,70	6,24	2,78	6,18	2,92	6,60
0,91	2,60	5,20	2,75	5,63	2,77	6,40	2,78	7,35	2,84	7,40	3,00	7,80
0,90	2,65	5,80	2,80	6,30	2,80	7,16	2,82	8,22	2,88	8,80	3,08	9,08
0,89	2,65	6,32	2,85	7,10	2,80	8,10	2,82	9,20	2,92	10,30	3,12	10,56
0,88	—	—	2,87	—	2,80	—	2,82	—	2,96	—	3,16	—

d/D_B	$Re=10^4$		$Re=2 \cdot 10^4$		$Re=4 \cdot 10^4$		$Re=10^5$		$Re=2 \cdot 10^5$		$Re=4 \cdot 10^5$	
	$Nu/Nu_{гр}$	$\xi/\xi_{гр}$	$Nu/Nu_{гр}$	$\xi/\xi_{гр}$	$Nu/Nu_{гр}$	$\xi/\xi_{гр}$	$Nu/Nu_{гр}$	$\xi/\xi_{гр}$	$Nu/Nu_{гр}$	$\xi/\xi_{гр}$	$Nu/Nu_{гр}$	$\xi/\xi_{гр}$
	$t/D_B=0,5$											
0,99	1,23	1,34	1,28	1,12	1,22	1,16	1,25	1,20	1,28	1,20	1,32	1,08
0,98	1,50	1,68	1,52	1,40	1,45	1,40	1,48	1,48	1,55	1,45	1,61	1,37
0,97	1,70	2,04	1,75	1,70	1,65	1,80	1,71	1,84	1,80	1,88	1,88	1,73
0,96	1,88	2,40	1,92	2,10	1,86	2,30	1,92	2,36	2,04	2,50	2,10	2,25
0,95	2,05	2,90	2,08	2,90	2,06	3,04	2,12	3,05	2,21	3,22	2,28	2,97
0,94	2,20	3,45	2,26	3,60	2,24	3,80	2,22	3,90	2,38	4,08	2,45	3,81
0,93	2,32	4,00	2,40	4,50	2,38	4,60	2,37	5,00	2,50	4,92	2,61	4,80
0,92	2,40	4,70	2,54	5,30	2,50	5,45	2,49	6,16	2,61	5,90	2,74	5,78
0,90	2,54	6,30	2,69	7,20	2,68	7,28	2,67	8,56	2,77	8,13	2,92	8,30
0,89	2,58	7,30	2,70	8,20	2,70	8,50	2,70	9,90	2,81	9,65	2,98	9,80
0,88	2,58	8,50	2,72	9,23	2,70	10,1	2,70	11,50	2,85	10,50	3,00	11,60

d/D_B	$Re=10^4$		$Re=2 \cdot 10^4$		$Re=4 \cdot 10^4$		$Re=10^5$		$Re=2 \cdot 10^5$		$Re=4 \cdot 10^5$	
	$Nu/Nu_{гр}$	$\xi/\xi_{гр}$	$Nu/Nu_{гр}$	$\xi/\xi_{гр}$	$Nu/Nu_{гр}$	$\xi/\xi_{гр}$	$Nu/Nu_{гр}$	$\xi/\xi_{гр}$	$Nu/Nu_{гр}$	$\xi/\xi_{гр}$	$Nu/Nu_{гр}$	$\xi/\xi_{гр}$
	$t/D_B=1,0$											
0,99	1,13	1,05	1,13	1,07	1,15	1,08	1,15	1,11	1,16	1,07	1,12	1,08
0,98	1,27	1,10	1,25	1,15	1,30	1,16	1,34	1,27	1,40	1,28	1,28	1,20
0,97	1,41	1,15	1,40	1,20	1,45	1,27	1,54	1,45	1,55	1,53	1,43	1,40
0,96	1,57	1,25	1,55	1,30	1,61	1,50	1,70	1,72	1,70	1,85	1,60	1,65
0,95	1,69	1,40	1,65	1,46	1,73	1,82	1,85	2,02	1,82	2,20	1,75	1,95
0,94	1,81	1,80	1,82	1,72	1,86	2,80	1,97	2,39	1,96	2,61	1,90	2,40
0,93	1,93	2,44	1,95	2,08	1,99	2,94	2,05	2,85	2,08	3,07	2,08	2,90
0,92	2,06	3,05	2,09	2,80	2,13	3,50	2,21	3,45	2,20	3,52	2,21	3,40
0,91	2,17	3,72	2,21	3,76	2,23	4,30	2,32	4,38	2,32	4,40	2,35	4,13
0,90	2,27	4,52	2,38	4,80	2,35	5,50	2,41	5,60	2,40	4,76	2,47	4,08
0,89	2,38	5,62	2,48	5,90	2,45	6,90	2,52	6,80	2,50	5,80	2,57	6,20
0,88	2,48	7,00	2,60	7,30	2,58	8,25	2,60	8,30	2,60	7,20	2,66	7,45
0,87	2,54	10,00	2,70	9,95	2,66	10,00	2,67	10,00	2,68	9,50	2,74	9,00
0,86	2,62	—	2,81	—	2,75	—	2,72	—	2,75	—	2,80	—

В (24) и (25) $Nu_{гр}$ определяется по формуле

$$Nu_{гр} = 0,023 Re_x^{0,8} Pr_x^{0,4} \quad (26)$$

Данные по коэффициентам гидравлического сопротивления обобщаются в диапазоне $Re_x = 10^4 \dots 4 \cdot 10^5$ следующими зависимостями:

$$\left(\frac{\xi}{\xi_{гр}}\right)_x = \left[1 + \frac{100(\lg Re_x - 4,6)(1 - d_B/D_B)^{1,65}}{\exp(t/D_B)^{0,3}}\right] \exp\left[\frac{25(1 - d_B/D_B)^{1,32}}{(t/D_B)^{0,75}}\right], \quad (27)$$

справедливой для $d_B/D_B = 0,90 \dots 0,97$, $t/D_B = 0,25 \dots 1,0$;

$$\left(\frac{\xi}{\xi_{гр}}\right)_x = \left[1 + \frac{\lg Re_x - 4,6}{3,4 \frac{Re_x}{10^5} + 6}\right] \left(1,3 - \sqrt{\frac{d_B - 0,93}{D_B}}\right) \exp\left[209(1 - d_B/D_B)^{1,05}\right], \quad (28)$$

справедливой для $d_B/D_B = 0,88 \dots 0,98$, $t/D_B = 0,5$;

$$\left(\frac{\xi}{\xi_{гр}}\right)_x = \left[1 + \frac{\lg Re_x - 4,6}{6 \left(\frac{Re_x}{10^5}\right)^{0,33}}\right] \left(3 \frac{d_B}{D_B} - 2\right) \left(2,5 - 1,5 \frac{d_B}{D_B}\right) \exp\left[17(1 - d_B/D_B)^{0,358}\right], \quad (29)$$

справедливой для $d_B/D_B = 0,90 \dots 0,98$, $t/D_B = 0,25$.

В (27) - (29) $\xi_{гр}$ определяется по формуле

$$\xi_{гр} = \frac{0,3164}{Re_x^{0,25}}$$

Формулы (24) - (29) громоздки, поэтому практические расчеты удобнее вести с помощью табл. I, где значения $(Nu/Nu_{гр})_x$ и $(\xi/\xi_{гр})_x$ приведены в зависимости от Re_x , d_B/D_B и t/D_B [5].

Если в рассматриваемом теплообменном аппарате используются не гладкие трубы, а трубы с турбулизаторами (накатанные трубы), то для расчета гидравлического сопротивления и теплоотдачи внутри труб используются зависимости

$$\xi_x = \frac{0,3164}{Re_x^{0,25}} \left(\frac{\xi}{\xi_{гр}}\right)_{Re_x}; \quad (30)$$

$$Nu_x = 0,023 Re_x^{0,8} Pr_x^{0,4} \left(\frac{Nu}{Nu_{гр}}\right)_{Re_x}, \quad (31)$$

где индекс " Re_x " означает, что отношения $\xi/\xi_{гр}$ и $Nu/Nu_{гр}$ берутся при Re_x .

Для расчета теплоотдачи и гидравлического сопротивления в межтрубном пространстве вместо (2) и (6) применяются формулы

$$\alpha_r = \frac{C_1 \lambda_r Re_r^{0,6}}{D_n} \left(\frac{Nu}{Nu_{гр}}\right)_{Re_r} = K_r Re_r^{0,6} \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}; \quad (32)$$

$$\Delta p_r = C_2 C_3 (\alpha_2 + 1) Re_r^{-0,27} \rho_r \bar{w}_r^2 \left(\frac{\xi}{\xi_{гр}}\right)_{Re_r} \text{ Н/м}^2, \quad (33)$$

где индекс " Re_r " означает, что отношения $Nu/Nu_{гр}$ и $\xi/\xi_{гр}$ берутся при Re_r .

Для поперечного обтекания пучков труб с кольцевыми канавками принимаем

$$\left(\frac{Nu}{Nu_{in}}\right)_{Re_r} \cong \left(\frac{\xi}{\xi_{in}}\right)_{Re_r} \cong 1,15 \dots 1,2. \quad (34)$$

В этом случае необходимо внести коррективы в формулы (7), (15), (16), (17), (18), которые соответственно примут вид

$$\xi_{conpr} = \frac{\Delta Pr}{Pr \cdot \nu \cdot \xi} = 2C_2 C_3 (\xi_2 + 1) Re_r^{-0,20} \left(\frac{\xi}{\xi_{in}}\right)_{Re_r}; \quad (35)$$

$$b = \frac{Re_r^{0,4} Pr_r (S_1 - D_H) S_2}{C_1 \xi D_H \left(\frac{Nu}{Nu_{in}}\right)_{Re_r}} \frac{T_r' - T_r''}{\Delta T_r}; \quad (36)$$

$$\xi_2 = \frac{b}{S_2} = \frac{Re_r^{0,4} Pr_r (S_1 - D_H)}{C_1 \xi D_H \left(\frac{Nu}{Nu_{in}}\right)_{Re_r}} \frac{T_r' - T_r''}{\Delta T_r}; \quad (37)$$

$$\xi_{conpr} = \frac{2C_2 C_3 C_1' Re_r^{0,13} Pr_r (S_1 - D_H) \left(\frac{\xi}{\xi_{in}}\right)_{Re_r}}{C_1 \xi D_H \left(\frac{Nu}{Nu_{in}}\right)_{Re_r}} \frac{T_r' - T_r''}{\Delta T_r}; \quad (38)$$

$$\xi_{conpr} = \frac{6C_2 C_3 (S_1 - D_H) Pr_r (T_r' - T_r'')}{C_1 \xi D_H \Delta T_r} \frac{(\xi / \xi_{in})_{Re_r}}{(Nu / Nu_{in})_{Re_r}} = \frac{K_1}{\Delta T_r}. \quad (39)$$

Нетрудно заметить, что если принять $(Nu / Nu_{in})_{Re_r} = (\xi / \xi_{in})_{Re_r}$, то (38) и (39) будут идентичны (17) и (18). Изменяются и формулы для теплоотдачи и гидравлического сопротивления внутри труб, применяемые при решении уравнения (21). Вместо (22) и (23) необходимо использовать формулы

$$\alpha_x = \frac{0,023 Re_x^{0,8} Pr_x^{0,41} \lambda_x \left(\frac{Nu}{Nu_{in}}\right)_{Re_r}}{D_B} = K_x Re_x^{0,8}; \quad (40)$$

$$\xi_x \frac{c}{D_B} m_x = \frac{1,75 (T_x'' - T_x')}{\Delta T_x} \frac{(\xi / \xi_{in})_{Re_x}}{(Nu / Nu_{in})_{Re_x}} = \frac{K_2}{\Delta T_x}. \quad (41)$$

3. ПОРЯДОК РАСЧЕТА

1. Определяем тепловую мощность теплообменника:

$$Q = G_x (i_x'' - i_x'), \quad (42)$$

где i_x'' и i_x' - энтальпии водорода при давлении P_x' и температурах T_x'' и T_x' соответственно. Теплофизические свойства водорода приведены в табл. 2 [6].

Таблица 2
Термодинамические свойства нормального водорода при различных температурах и давлениях: V (см³/моль), I (Дж/моль), S и c_p (Дж/моль·К)

$p \cdot 10^5 / Pa$	V	I	S	c_p	V	I	S	c_p
T=160 K								
1	13 311	4 632	113,49	25,87	14 975	5 158	116,60	26,66
2	6 659,2	4 631	107,72	25,89	7 492,4	5 157	110,83	26,68
4	3 333,5	4 630	101,94	25,94	3 751,0	5 156	105,05	26,72
6	2 325,0	4 628	98,55	25,98	2 503,9	5 155	101,66	26,75
8	1 670,8	4 627	96,14	26,03	1 880,3	5 155	99,25	26,78
10	1 318,3	4 625	94,26	26,07	1 506,2	5 154	97,38	26,82
12	1 116,6	4 624	92,73	26,11	1 256,8	5 153	95,85	26,85
14	958,3	4 622	91,43	26,16	1 078,7	5 153	94,55	26,89
16	839,6	4 621	90,30	26,20	945,1	5 152	93,43	26,92
18	747,2	4 619	89,30	26,24	841,2	5 151	92,44	26,95
20	673,4	4 618	88,40	26,28	758,2	5 151	91,55	26,98
30	452,0	4 612	84,94	26,49	508,9	5 148	88,11	27,14
40	341,4	4 607	82,47	26,68	384,4	5 147	85,65	27,29
50	275,1	4 603	80,53	26,86	309,8	5 146	83,73	27,43
60	231,1	4 600	78,93	27,03	260,1	5 146	82,16	27,56
80	176,2	4 596	76,40	27,84	198,2	5 147	79,65	27,80
100	143,4	4 595	74,41	27,61	161,1	5 151	77,70	28,02
150	100,1	4 605	70,76	28,17	112,0	5 171	74,10	28,47
200	78,72	4 629	68,15	28,55	87,74	5 202	71,53	28,81
250	66,11	4 664	66,12	28,77	73,31	5 242	69,54	29,04
300	57,82	4 709	64,48	28,88	68,79	5 290	67,91	29,18
400	47,61	4 821	61,91	28,98	52,01	5 404	65,36	29,33
500	41,53	4 951	59,95	29,02	45,03	5 535	63,40	29,41
600	37,46	5 090	59,36	29,01	40,36	5 675	61,82	29,46
800	32,30	5 387	55,89	28,88	34,44	5 971	59,33	29,47
1000	29,12	5 697	54,00	28,71	30,80	6 278	57,43	29,49
T=200 K								
1	16 640	5 697	119,43	27,29	18 303	6 248	122,06	27,79
2	8 325,2	5 697	113,66	27,31	9 147,7	6 248	116,29	27,80
4	4 168,0	5 697	107,89	27,33	4 594,8	6 249	110,52	27,82
6	2 782,3	5 696	104,50	27,36	3 060,5	6 249	107,14	27,85
8	2 089,5	5 696	102,10	27,39	2 298,4	6 249	104,74	27,87
10	1 673,8	5 696	100,23	27,42	1 841,1	6 250	102,87	27,89
12	1 396,7	5 696	98,71	27,44	1 536,3	6 250	101,14	27,91
14	1 198,8	5 696	97,41	27,47	1 318,6	6 250	100,06	27,93
16	1 030,3	5 696	96,39	27,50	1 155,3	6 251	98,94	27,96
18	934,9	5 696	95,30	27,52	1 023,3	6 251	97,95	27,98
20	842,5	5 696	94,41	27,55	926,7	6 252	97,06	28,00
30	565,5	5 697	90,99	27,67	621,9	6 254	93,65	28,10
40	427,1	5 697	88,55	27,79	469,6	6 258	91,22	28,20
50	344,2	5 699	86,64	27,90	378,1	6 261	89,32	28,29
60	388,9	5 701	85,08	28,01	317,4	6 265	87,77	28,34
80	219,9	5 707	82,60	28,21	241,4	6 275	85,40	28,44
100	178,6	5 715	80,66	28,38	196,0	6 286	83,38	28,68
150	123,8	5 743	77,11	28,75	135,5	6 321	79,86	28,99
200	96,64	5 780	74,57	29,04	103,1	6 361	77,15	29,24
250	80,43	5 825	72,60	29,26	87,48	6 412	75,40	29,41
300	69,70	5 876	70,98	29,40	75,57	6 466	73,80	29,48
400	56,42	5 943	68,43	29,57	60,79	6 587	71,28	29,74
500	48,51	6 125	66,51	29,64	51,94	6 721	69,14	29,84
600	43,23	6 267	64,93	29,71	46,11	6 864	67,77	29,91
800	36,58	6 563	62,44	29,82	38,71	7 162	65,40	30,09
1000	32,50	6 870	60,54	29,81	34,21	7 469	63,40	30,08

$r \cdot 10^5 \text{ Па}$	γ	I	S	C_p	γ	I	S	C_p
$T=240 \text{ K}$				$T=260 \text{ K}$				
1	19 967	6 807	124,48	28,18	21 681	7 375	126,76	28,53
2	9 990,0	6 808	118,71	28,19	10 822	7 375	120,99	28,53
4	5 001,3	6 808	112,94	28,20	5 417,8	7 376	115,22	28,55
6	3 338,5	6 809	109,57	28,22	3 616,3	7 377	111,84	28,57
8	2 507,1	6 810	107,17	28,24	2 715,6	7 378	109,45	28,58
10	2 008,2	6 811	105,80	28,26	2 175,2	7 379	107,59	28,60
12	1 675,7	6 811	103,78	28,28	1 814,9	7 381	106,06	28,61
14	1 438,1	6 812	102,49	28,30	1 557,6	7 382	104,78	28,63
16	1 260,0	6 813	101,37	28,31	1 364,6	7 383	103,66	28,64
18	1 121,4	6 814	100,39	28,33	1 214,5	7 384	102,67	28,66
20	1 010,6	6 815	99,50	28,35	1 094,4	7 385	101,79	28,67
30	678,1	6 819	96,10	28,48	734,2	7 391	98,39	28,74
40	511,9	6 824	93,67	28,51	554,1	7 398	95,97	28,81
50	412,3	6 829	91,78	28,59	446,1	7 404	94,09	28,87
60	345,8	6 835	90,24	28,66	374,1	7 411	92,55	28,94
80	262,9	6 848	87,79	28,90	284,2	7 426	90,11	29,05
100	213,2	6 862	85,87	28,92	230,3	7 443	88,21	29,16
150	147,1	6 902	82,38	29,18	158,5	7 488	84,73	29,38
200	114,1	6 949	79,89	29,39	122,8	7 539	82,26	29,56
250	94,47	7 001	77,95	29,56	101,4	7 594	80,83	29,71
300	81,40	7 038	76,36	29,70	87,18	7 653	78,75	29,84
400	65,14	7 182	78,86	29,87	69,46	7 781	76,27	30,01
500	55,48	7 318	71,98	29,97	58,87	7 919	74,34	30,10
600	48,98	7 462	70,37	30,08	51,83	8 064	72,78	30,17
800	40,86	7 763	67,91	30,15	42,99	8 368	70,33	30,27
1000	35,90	8 072	66,01	30,28	37,60	8 684	68,44	30,37
$T=280 \text{ K}$				$T=300 \text{ K}$				
1	23 294	7 946	128,37	28,70	24 958	8 522	180,86	28,85
2	11 654	7 946	123,41	28,71	12 466	8 523	125,09	28,86
4	5 834,0	7 948	117,34	28,72	6 250,2	8 524	119,33	28,87
6	3 894,0	7 949	113,96	28,73	4 171,6	8 526	115,95	28,88
8	2 924,0	7 950	111,57	28,75	3 132,3	8 528	118,55	28,89
10	2 342,0	7 952	109,71	28,76	2 506,8	8 529	111,70	28,90
12	1 954,0	7 953	108,19	28,77	2 093,1	8 531	110,18	28,92
14	1 676,9	7 955	106,90	28,78	1 796,1	8 533	108,89	28,93
16	1 469,0	7 956	105,78	28,80	1 573,4	8 534	107,77	28,94
18	1 307,4	7 958	104,80	28,81	1 400,2	8 536	106,79	28,95
20	1 178,1	7 959	103,92	28,82	1 261,7	8 538	105,91	28,96
30	790,1	7 966	100,52	28,88	846,0	8 546	102,52	29,01
40	596,2	7 974	98,11	28,94	638,2	8 555	100,11	29,07
50	479,8	7 982	96,23	29,00	513,5	8 564	98,53	29,11
60	402,3	7 990	94,69	29,05	430,4	8 573	96,70	29,15
80	305,4	8 007	92,26	29,15	326,5	8 592	94,37	29,24
100	247,3	8 025	90,37	29,24	264,3	8 612	92,39	29,32
150	170,0	8 075	86,91	29,43	181,4	8 665	88,94	29,51
200	131,4	8 129	84,45	29,59	140,0	8 742	86,49	29,68
250	108,3	8 187	82,58	29,69	115,2	8 783	84,88	29,75
300	92,94	8 249	80,96	29,82	98,67	8 827	83,02	29,85
400	73,77	8 380	78,48	30,00	78,06	8 981	80,55	30,00
500	62,30	8 520	76,57	30,09	65,72	9 153	78,65	30,09
600	54,67	8 667	75,01	30,16	57,51	9 271	77,09	30,15
800	45,10	8 972	72,57	30,25	47,22	9 578	74,66	30,24
1000	39,29	9 284	70,69	30,35	40,98	9 892	72,78	30,31
$T=350 \text{ K}$				$T=400 \text{ K}$				
1	29 116	9 971	135,34	29,09	33 273	11 429	189,33	29,19
2	14 565	9 972	129,57	29,09	16 615	11 429	133,47	29,19
4	7 290,4	9 974	123,81	29,10	8 390,3	11 412	127,70	29,20
6	4 866,4	9 976	120,43	29,11	6 558,8	11 434	121,33	29,20
8	3 652,8	9 978	118,04	29,12	4 722,1	11 446	121,94	29,21
10	2 925,1	9 981	116,18	29,11	3 541,6	11 449	120,08	29,21
12	2 489,3	9 982	114,66	29,13	2 787,3	11 441	118,56	29,22

$r \cdot 10^5 \text{ Па}$	γ	I	S	C_p	γ	I	S	C_p
14	2 083,9	9 985	113,38	29,14	2 301,1	11 444	117,28	29,22
16	1 834,1	9 987	112,27	29,15	2 094,5	11 446	116,17	29,23
18	1 632,0	9 989	111,28	29,16	1 863,5	11 449	115,19	29,23
20	1 470,3	9 991	110,40	29,16	1 678,8	11 454	114,31	29,24
30	935,4	10 002	107,02	29,20	1 124,5	11 463	110,93	29,27
40	742,9	10 012	104,62	29,24	847,3	11 463	108,58	29,29
50	597,4	10 023	102,75	29,27	681,0	11 488	108,66	29,32
60	500,0	10 035	101,22	29,30	570,2	11 501	105,14	29,34
80	379,2	10 057	98,80	29,37	431,7	11 526	102,73	29,39
100	306,5	10 080	96,93	29,43	348,5	11 552	100,86	29,44
150	209,6	10 141	93,51	29,55	237,7	11 618	97,45	29,53
200	161,2	10 204	91,07	29,66	182,3	11 686	95,03	29,61
250	132,2	10 281	89,18	29,75	149,1	11 756	93,15	29,68
300	112,9	10 338	87,63	29,82	127,0	11 826	91,61	29,74
400	88,72	10 479	85,19	29,95	99,30	11 974	89,18	29,84
500	74,23	10 626	83,29	30,03	82,68	12 124	87,30	29,92
600	64,57	10 777	81,65	30,09	71,60	12 278	85,76	29,97
800	52,47	11 088	79,33	30,17	60,49	12 513	83,89	30,04
1000	45,17	11 405	47,46	30,22	51,10	12 832	81,92	30,08
$T=450 \text{ K}$				$T=500 \text{ K}$				
1	37 431	12 883	142,66	29,24	41 588	14 350	145,75	29,27
2	18 724	12 889	136,90	29,24	20 803	14 352	139,97	29,27
4	9 369,9	12 892	131,13	29,25	10 419	14 355	134,21	29,27
6	6 252,1	12 894	127,76	29,25	6 945,2	14 358	130,85	29,27
8	4 693,1	12 897	125,37	29,26	5 213,0	14 360	128,45	29,28
10	3 757,7	12 900	123,51	29,26	4 173,7	14 363	126,60	29,28
12	3 134,2	12 902	121,99	29,27	3 480,9	14 366	125,08	29,28
14	2 688,7	12 905	120,71	29,27	2 986,0	14 369	123,80	29,29
16	2 354,7	12 908	119,60	29,27	2 614,8	14 372	122,69	29,29
18	2 094,9	12 911	118,62	29,28	2 326,1	14 375	121,71	29,29
20	1 887,0	12 913	117,74	29,28	2 095,1	14 378	120,83	29,30
30	1 263,4	12 927	114,36	29,30	1 402,3	14 392	117,45	29,31
40	951,6	12 940	111,97	29,32	1 055,8	14 406	115,06	29,33
50	764,6	12 954	110,10	29,34	848,0	14 421	113,20	29,34
60	640,0	12 967	108,58	29,36	709,4	14 435	111,68	29,36
80	484,0	12 995	106,18	29,40	536,2	14 464	109,28	29,39
100	390,4	13 022	104,31	29,43	432,2	14 494	107,42	29,41
150	265,7	13 093	100,92	29,51	293,6	14 587	104,01	29,48
200	203,4	13 164	98,50	29,57	224,3	14 642	101,62	29,53
250	166,0	13 237	96,63	29,63	182,7	14 717	99,75	29,57
300	141,0	13 312	95,10	29,65	155,0	14 794	98,22	29,61
400	109,8	13 468	92,68	29,76	120,3	14 948	95,81	29,68
500	91,10	13 617	90,80	29,82	99,48	15 105	93,94	29,73
600	78,59	13 773	89,27	29,87	85,57	15 264	92,42	29,77
800	62,93	14 090	86,87	29,93	68,13	15 584	90,02	29,83
1000	53,48	14 412	85,01	29,96	57,63	15 907	88,16	29,88
$T=550 \text{ K}$				$T=600 \text{ K}$				
1	45 746	15 815	148,54	29,30	49 903	17 280	151,09	29,34
2	22 881	15 816	142,78	29,30	24 960	17 281	145,32	29,34
4	11 449	15 819	137,01	29,30	12 788	17 284	139,56	29,34
6	7 638,2	15 822	133,64	29,31	8 331,2	17 287	136,19	29,34
8	5 732,9	15 825	131,23	29,31	6 252,6	17 291	133,80	29,34
10	4 589,6	15 828	129,39	29,31	5 005,5	17 294	131,94	29,34
12	3 827,5	15 831	127,87	29,31	4 174,0	17 297	130,42	29,35
14	3 283,1	15 834	126,59	29,31	3 580,2	17 300	129,14	29,35

Продолжение табл. 2

$p \cdot 10^5 / \text{Па}$	V	I	S	C_p	V	I	S	C_p
16	2 874,8	15 877	125,48	29,32	3 134,7	17 303	128,03	29,35
18	2 557,2	15 840	124,50	29,32	2 788,1	17 306	123,95	29,35
20	2 303,2	15 843	123,61	29,32	2 511,2	17 309	126,17	29,35
30	1 541,0	15 858	120,25	29,34	1 679,7	17 325	122,80	29,36
40	1 159,9	15 873	117,86	29,35	1 264,0	17 340	120,41	29,37
50	931,3	15 888	116,00	29,36	1 014,5	17 356	118,55	29,38
60	778,8	15 904	114,48	29,37	848,2	17 371	117,03	29,39
80	588,3	15 934	112,08	29,40	640,2	17 403	114,64	29,41
100	474,0	15 964	110,22	29,42	515,6	17 434	112,78	29,43
150	321,5	16 041	106,84	29,47	349,3	17 511	109,40	29,47
200	245,2	16 118	104,44	29,51	266,3	17 592	107,00	29,51
250	199,5	16 195	102,57	29,55	216,2	17 671	105,14	29,54
300	169,0	16 274	101,05	29,58	182,9	17 751	103,62	29,57
400	130,8	16 431	98,64	29,64	141,2	17 911	101,22	29,61
500	107,3	16 590	96,78	29,68	116,2	18 092	99,35	29,65
600	92,43	16 751	95,25	29,71	99,47	18 334	97,84	29,68
800	71,33	17 014	92,86	29,76	78,52	18 559	95,64	29,72
1000	61,77	17 361	90,22	29,79	65,90	18 885	93,60	29,74
$T=650 \text{ K}$				$T=700 \text{ K}$				
1	54 060	18 747	153,43	29,39	58 218	20 218	155,61	29,45
2	27 019	18 749	147,67	29,19	29 117	20 219	149,85	29,45
4	13 528	18 752	141,91	29,39	14 567	20 223	144,08	29,45
6	9 024,2	18 755	138,54	29,39	9 717,1	20 226	140,71	29,45
8	6 772,4	18 758	136,14	29,39	7 292,1	20 229	138,32	29,45
10	5 421,3	18 761	134,29	29,39	5 837,0	20 233	136,46	29,45
12	4 520,6	18 765	132,77	29,39	4 867,0	20 236	134,95	29,46
14	3 877,2	18 768	131,49	29,39	4 174,2	20 239	133,67	29,46
16	3 394,6	18 771	130,38	29,40	3 654,5	20 242	132,56	29,46
18	3 019,3	18 774	129,40	29,40	3 250,3	20 246	131,58	29,46
20	2 719,1	18 776	128,52	29,40	2 927,0	20 249	130,70	29,46
30	1 818,4	18 794	125,15	29,41	1 957,0	20 265	127,33	29,46
40	1 368,0	18 810	122,76	29,45	1 473,0	20 282	124,94	29,47
50	1 097,8	18 826	120,90	29,45	1 180,9	20 298	123,08	29,48
60	917,6	18 842	119,39	29,44	986,9	20 315	121,56	29,49
80	692,4	18 874	116,99	29,45	744,4	20 348	119,17	29,50
100	557,3	18 906	115,11	29,46	598,9	20 381	117,31	29,51
150	377,1	18 987	111,76	29,50	404,8	20 463	113,94	29,54
200	286,9	19 068	109,36	29,53	307,8	20 545	111,54	29,56
250	232,9	19 148	107,50	29,55	249,5	20 627	109,69	29,59
300	196,8	19 229	105,98	29,58	210,7	20 709	108,17	29,61
400	151,6	19 392	103,58	29,62	162,0	20 871	105,77	29,64
500	124,5	19 554	101,71	29,65	132,8	21 037	103,92	29,67
600	106,4	19 718	100,21	29,67	113,3	21 201	102,40	29,69
800	81,71	20 044	97,82	29,70	88,89	21 510	100,02	29,71
1000	70,03	20 371	95,97	29,72	74,16	21 858	98,17	29,73
$T=750 \text{ K}$				$T=800 \text{ K}$				
1	62 375	21 691	157,64	29,53	66 512	23 169	159,55	29,63
2	31 196	21 693	151,88	29,53	33 275	23 171	153,79	29,63
4	15 606	21 696	146,12	29,53	18 646	23 174	148,02	29,63
6	10 410	21 700	142,74	29,53	11 103	23 178	144,65	29,63
8	7 811,7	21 703	140,95	29,53	8 331,4	23 181	142,26	29,64
10	6 252,8	21 707	138,50	29,53	6 668,5	23 185	140,41	29,64
12	5 211,5	21 710	136,98	29,54	5 559,9	23 188	138,89	29,65
14	4 471,1	21 713	135,70	29,54	4 768,1	23 191	137,61	29,64
16	3 914,4	21 717	134,59	29,54	4 174,2	23 195	136,50	29,64
18	3 481,3	21 720	133,61	29,54	3 712,1	23 198	135,52	29,64
20	3 134,9	21 723	132,73	29,54	3 342,8	23 202	134,64	29,64
30	2 095,6	21 740	129,36	29,55	2 234,2	23 217	131,27	29,64
40	1 575,9	21 757	126,97	29,55	1 679,9	23 236	128,98	29,64
50	1 264,1	21 774	125,11	29,56	1 347,3	23 252	127,02	29,65
60	1 056,2	21 790	123,60	29,56	1 125,5	23 269	125,51	29,66
80	796,4	21 824	121,21	29,57	848,4	23 303	123,12	29,67

Продолжение табл. 2

$p \cdot 10^5 / \text{Па}$	V	I	S	C_p	V	I	S	C_p
100	640,5	21 857	119,35	29,58	682,1	23 337	121,26	29,68
150	432,6	21 940	115,98	29,60	460,3	21 422	117,89	29,70
200	328,6	22 024	113,58	29,63	349,4	23 506	115,50	29,71
250	266,2	22 107	111,73	29,66	282,8	23 590	113,64	29,73
300	224,5	22 190	110,21	29,69	238,4	21 674	112,12	29,74
400	172,4	22 355	107,82	29,72	182,8	23 841	109,74	29,77
500	141,2	22 521	105,96	29,71	149,5	24 017	107,88	29,79
600	120,3	22 686	104,45	29,73	127,2	24 173	106,37	29,80
800	94,06	23 016	102,07	29,76	99,23	24 504	103,99	29,82
1000	78,29	23 344	100,22	29,77	82,41	24 833	102,14	29,84
$T=850 \text{ K}$				$T=900 \text{ K}$				
1	76 689	24 658	161,35	29,75	74 846	26 145	162,95	29,89
2	35 353	24 657	155,59	29,75	37 432	26 146	157,29	29,89
4	17 685	24 660	149,82	29,75	16 724	26 150	151,52	29,89
6	11 796	24 664	146,45	29,76	12 489	26 153	148,15	29,89
8	8 851,0	24 667	144,06	29,76	9 170,7	26 157	145,76	29,89
10	7 084,2	24 670	142,21	29,76	7 499,9	26 160	143,91	29,89
12	6 066,4	24 674	140,69	29,76	6 252,8	26 163	142,39	29,89
14	5 065,0	24 677	139,41	29,76	5 361,9	26 167	141,11	29,89
16	4 434,0	24 681	138,30	29,76	4 693,8	26 171	140,00	29,89
18	3 943,2	24 684	137,32	29,76	4 174,2	26 174	139,02	29,89
20	3 550,6	24 688	136,44	29,76	3 758,4	26 178	138,14	29,89
30	2 372,7	24 705	133,07	29,76	2 411,3	26 195	134,77	29,90
40	1 783,8	24 722	130,68	29,77	1 887,7	26 210	132,38	29,90
50	1 430,4	24 739	128,83	29,77	1 613,5	26 230	130,53	29,90
60	1 194,8	24 756	127,31	29,78	1 264,1	26 247	129,01	29,90
80	900,3	24 791	124,92	29,78	952,3	26 282	126,62	29,91
100	723,6	24 825	123,06	29,79	765,2	26 316	124,77	29,92
150	488,1	24 910	117,30	29,82	515,7	26 402	121,40	29,93
200	370,1	24 995	115,45	29,83	390,9	26 409	119,01	29,94
250	299,4	25 080	113,93	29,85	316,0	26 574	117,15	29,95
300	252,2	25 165	113,93	29,85	266,1	26 659	115,64	29,97
400	193,2	25 333	111,45	29,87	203,6	26 828	113,25	29,99
500	157,1	25 500	109,69	29,89	166,0	26 996	111,40	30,00
600	134,1	25 667	108,18	29,90	141,0	26 997	109,89	30,01
800	104,4	25 998	105,80	29,92	109,7	27 496	107,51	30,03
1000	86,53	26 328	103,86	29,93	90,66	27 826	105,66	30,03
$T=950 \text{ K}$				$T=1000 \text{ K}$				
1	79 004	27 643	164,67	30,04	81 161	29 149	166,22	30,21
2	39 510	27 645	158,91	30,04	41 589	29 151	160,45	30,21
4	19 754	27 649	153,15	30,05	26 803	29 154	154,69	30,21
6	13 181	27 652	149,77	30,05	18 874	29 158	151,32	30,21
8	9 890,3	27 656	147,38	30,05	10 410	29 162	148,93	30,21
10	7 915,6	27 659	145,53	30,05	8 331,3	29 165	147,17	30,21
12	6 599,2	27 663	144,01	30,05	6 945,6	29 169	145,46	30,21
14	5 658,9	27 666	142,73	30,05	5 955,8	29 173	144,27	30,21
16	4 953,6	27 668	141,62	30,05	5 213,4	29 176	143,16	30,21
18	4 405,1	27 673	140,64	30,05	4 636,0	29 179	142,19	30,21
20	3 966,3	27 677	139,76	30,05	4 174,1	29 183	141,31	30,21
30	2 649,8	27 694	136,40	30,05	2 788,4	29 200	137,94	30,22
40	1 991,6	27 712	134,00	30,05	2 095,5	29 218	135,55	30,22
50	1 596,6	27 729	132,15	30,06	1 679,8	29 235	133,69	30,22
60	1 333,3	27 747	130,61	30,06	1 402,6	29 253	132,18	30,22
80	1 004,2	27 781	128,24	30,06	1 056,1	29 288	129,79	30,23
100	806,7	27 816	126,39	30,07	848,1	29 323	127,93	30,23
150	543,2	27 903	123,02	30,09	571,1	29 410	124,57	30,24
200	411,7	27 989	120,61	30,10	432,4	29 497	122,18	30,25
250	332,6	28 095	118,78	30,11	349,2	29 584	120,32	30,26
300	279,9	28 161	117,26	30,11	293,7	29 670	118,81	30,27
400	214,0	28 331	114,88	30,13	224,3	29 841	116,41	30,28
500	174,3	28 500	113,00	30,14	182,6	30 010	114,58	30,29
600	147,4	28 608	111					

Продолжение табл. 2

$P \cdot 10^5 / \text{Па}$	γ	I	S	C_p	γ	I	S	C_p
T=1100 K				T=1200 K				
1	91 475	32 189	169,12	30,58	99 789	35 265	171,79	30,99
2	45 746	32 190	163,36	30,58	49 903	35 267	166,03	30,99
4	22 881	32 194	157,59	30,58	24 960	35 270	160,27	30,99
6	15 260	32 198	154,22	30,59	16 646	35 274	156,90	30,99
8	11 449	32 201	151,83	30,59	12 488	35 278	154,50	30,99
10	9 162,7	32 205	149,98	30,59	9 994,0	35 281	152,65	30,99
12	7 638,4	32 208	148,46	30,59	8 331,4	35 285	151,13	30,99
14	6 549,6	32 212	147,28	30,59	7 143,4	35 288	149,85	30,99
16	5 733,0	32 215	146,07	30,59	6 252,5	35 292	148,74	30,99
18	5 097,9	32 219	145,09	30,59	5 559,7	35 296	147,76	30,99
20	4 589,7	32 222	144,21	30,59	5 005,4	35 299	146,89	30,99
30	3 065,4	32 240	141,04	30,59	3 342,5	35 317	143,62	31,00
40	2 303,3	32 258	138,45	30,59	2 511,0	35 335	141,13	31,00
50	1 846,0	32 276	136,60	30,59	2 012,2	35 353	139,27	31,00
60	1 541,1	32 293	135,08	30,59	1 679,6	35 371	137,76	31,00
80	1 160,0	32 329	132,69	30,60	1 263,8	35 406	135,37	31,00
100	931,3	32 364	130,84	30,60	1 014,4	35 442	133,51	31,00
150	626,4	32 452	127,47	30,60	681,8	35 530	130,15	31,01
200	473,9	32 540	125,08	30,61	515,4	35 619	127,76	31,01
250	382,4	32 627	123,23	30,62	415,6	35 706	125,91	31,01
300	321,4	32 714	121,72	30,62	349,0	35 794	124,40	31,02
400	245,0	32 886	119,34	30,63	265,8	35 967	122,01	31,03
500	199,2	33 057	117,49	30,64	215,8	36 138	120,16	31,03
600	168,6	33 226	115,98	30,63	182,4	36 308	118,65	31,04
800	130,2	33 560	113,60	30,66	140,6	36 643	116,28	31,05
1000	107,0	33 891	111,76	30,66	115,4	36 974	114,43	31,05

$P \cdot 10^5 / \text{Па}$	γ	I	S	C_p	γ	I	S	C_p
T=1300 K				T=1400 K				
1	108 100	38 386	174,29	31,43	116 420	41 551	176,64	31,87
2	54 060	38 388	168,53	31,43	58 217	41 553	170,88	31,87
4	27 038	38 392	162,76	31,43	29 117	41 556	165,11	31,87
6	16 031	38 395	159,39	31,43	19 417	41 560	161,74	31,87
8	13 527	38 399	157,00	31,43	14 567	41 564	159,35	31,87
10	10 825	38 403	155,15	31,43	11 667	41 567	157,50	31,87
12	9 023,9	38 406	153,83	31,43	9 716,7	41 571	155,98	31,87
14	7 737,1	38 410	152,35	31,43	8 330,9	41 574	154,70	31,87
16	6 772,1	38 413	151,24	31,43	7 291,6	41 578	153,59	31,87
18	6 021,5	38 417	150,26	31,43	6 483,3	41 582	152,61	31,87
20	5 421,0	38 421	149,38	31,43	5 836,6	41 585	151,73	31,87
30	3 619,5	38 439	146,01	31,43	3 896,6	41 603	148,36	31,87
40	2 718,8	38 457	143,62	31,43	2 926,6	41 621	145,97	31,87
50	2 178,4	38 474	141,77	31,43	2 344,5	41 639	144,12	31,87
60	1 818,1	38 492	140,25	31,44	1 956,5	41 657	142,60	31,87
80	1 367,7	38 528	137,96	31,44	1 471,5	41 693	140,21	31,87
100	1 097,4	38 564	136,01	31,44	1 180,5	41 729	138,36	31,88
150	737,1	38 653	132,64	31,44	792,4	41 818	134,99	31,88
200	556,9	38 741	130,26	31,44	598,4	41 907	132,61	31,88
250	448,8	38 830	128,41	31,45	481,9	41 995	130,76	31,88
300	376,7	38 917	126,90	31,45	404,3	42 083	129,25	31,88
400	286,5	39 091	124,51	31,45	307,2	42 257	126,86	31,89
500	232,3	39 263	122,66	31,46	248,9	42 430	125,01	31,89
600	196,2	39 433	121,16	31,46	209,9	42 600	123,51	31,89
800	150,9	39 769	118,78	31,47	161,2	42 936	121,13	31,90
1000	123,6	40 100	116,93	31,47	131,9	43 267	119,39	31,90

$P \cdot 10^5 / \text{Па}$	γ	I	S	C_p	$P \cdot 10^5 / \text{Па}$	γ	I	S	C_p
T=1500 K									
1	124 730	44 759	178,85	32,30	50	2510,7	44 848	146,33	32,31
2	62 374	44 761	173,09	32,30	60	2095,0	44 866	144,82	32,31
4	31 185	44 765	167,33	32,30	80	1575,3	44 902	142,43	32,31
6	20 802	44 768	163,96	32,30	100	1263,5	44 937	140,58	32,31
8	15 606	44 772	161,57	32,30	150	847,8	45 027	137,21	32,31
10	12 488	44 776	159,71	32,30	200	639,9	45 116	134,82	32,31
12	10 409	44 779	158,20	32,30	250	515,1	45 204	132,97	32,31
14	8 924,7	44 782	156,91	32,30	300	431,0	45 282	131,46	32,31
16	7 811,2	44 786	155,80	32,30	400	327,9	45 467	129,08	32,31
18	6 945,1	44 791	154,82	32,30	500	265,4	45 639	127,23	32,31
20	6 252,2	44 794	153,95	32,30	600	223,7	45 810	125,72	32,32
30	4 173,6	44 812	150,58	32,31	800	171,5	46 147	123,34	32,32
40	3 134,3	44 830	148,19	32,31	1000	140,1	46 477	121,50	32,32

Продолжение табл. 2

Вязкость $\eta \cdot 10^6$ (Н · с / м²) водорода при температурах от 15 до 1000 К и давлениях от 10^5 до 10^8 Па

$P \cdot 10^5 / \text{Па}$	1	10	20	50	100	150	200	300	500	750	1000
15	2100	2239	2405								
16	1860	1988	2130	2570							
17	1680	1784	1911	2286	2940						
18	1520	1596	1711	2065	2638						
19	1400	1484	1588	1895	2407	2995					
20	1300	1381	1470	1740	2200	2700	3240				
21	116	1265	1350	1609	2038	2475	2955				
22	121	1172	1255	1495	1876	2302	2740				
23	125	1100	1175	1390	1760	2125	2525	3350			
25	135	960	1025	1230	1555	1875	2201	2900			
27	145	811	900	1091	1379	1654	1952	2539			
30	160	638	730	930	1200	1444	1690	2195			
33	175	220	598	805	1055	1275	1481	1901			
36	188	205	405	705	945	1140	1329	1704			
40	207	222	275	585	828	1000	1170	1506	2330		
45	228	236	265	470	717	880	1024	1311	1982		
50	249	254	280	420	625	790	925	1177	1741		
60	288	294	299	380	537	665	783	995	1324	2115	
80	358	362	368	400	480	570	655	810	1131	1561	2092
100	421	423	424	442	500	562	634	763	995	1307	1680
150	560	562	564	574	600	633	669	746	898	1082	1288
200	681	682	685	691	706	723	750	802	913	1047	1186
300	896	896	898	902	910	921	933	967	1030	1121	1210
500	1264	1264	1265	1267	1271	1275	1283	1296	1329	1379	1434
750	1660	1660	1660	1662	1664	1667	1670	1678	1697	1726	1759
1000	2013	2013	2013	2015	2017	2018	2020	2025	2036	2057	2079

Вязкость $\eta \cdot 10^6$ (Н · с / м²) диссоциированного водорода

$P \cdot 10^5 / \text{Па}$	10^{-4}	10^{-3}	10^{-2}	10^{-1}	0,1	1	10	100	200
1000	1997	1997	1997	1997	1997	1997	1997	1997	1997
1200	2262	2262	2262	2262	2262	2262	2262	2262	2262
1400	2507	2507	2507	2507	2507	2507	2507	2507	2507
1600	2740	2738	2737	2737	2737	2737	2737	2737	2737
1800	2988	2972	2965	2962	2962	2962	2962	2962	2962
2000	3215	3227	3200	3188	3183	3182	3181	3181	3181
2200	3123	3459	3475	3441	3425	3419	3417	3417	3417
2400	3038	3413	3728	3721	3682	3665	3659	3657	3657
2600	3172	3308	3770	3995	3957	3919	3904	3899	3898
2800	3359	3365	3623	3985	3957	3919	3904	3899	3898
3000	3565	3376	3675	4131	4497	4474	4421	4398	4395
3200	3773	3774	3813	4073	4636	4756	4690	4651	4645
3400	3973	3974	3988	4112	4642	5008	4966	4906	4896
3600	4164	4165	4171	4229	4601	5189	4966	4906	4896
3800	4348	4348	4351	4379	4604	5271	5154	5117	5115
4000	4529	4529	4531	4545	4674	5273	5149	5117	5115
4200	4708	4708	4708	4716	4791	5255	5134	5117	5115
4400	4886	4886	4886	4891	4935	5266	5134	5117	5115
4600	5061	5061	5061	5064	5091	5319	5114	5117	5115
4800	5237	5237	5237	5239	5256	5411	5114	5117	5115
5000	5414	5414	5414	5415	5426	5533	5114	5117	5115
5200	5591	5591	5591	5592	5600	5674	5114	5117	5115
5400	5770	5770	5770	5770	5776	5828	5229	5214	5214
5600	5950	5950	5950	5951	5955	5			

Теплопроводность $\lambda \cdot 10^8$ (Вт/(м·К)) водорода при различных температурах и давлениях																							
$p \cdot 10^5$ Па																							
T , К	1	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600		
80	53,2	55,8	60,0	63,2	66,9	69,8	74,7	78,8	81,8	86,3	90,2												
90	60,1	63,2	66,1	69,2	72,3	75,1	78,0	81,3	84,7	88,0	91,1	108											
100	67,0	70,7	72,6	75,7	77,8	80,9	83,6	86,5	89,2	91,6	94,8	109	119	128	138	147	156	165	174	—	—		
110	74,3	77,6	79,7	81,6	83,8	86,7	89,8	92,6	93,8	95,7	98,6	112	122	132	141	150	159	168	176	184	—		
120	81,5	83,5	85,6	87,7	89,5	91,6	94,7	96,8	98,7	101	104	119	123	134	143	152	161	170	178	186	194		
130	87,8	89,2	91,8	93,7	95,9	97,6	100	102	104	106	108	118	128	137	146	154	162	171	179	188	196		
140	94,6	96,4	98,2	100	102	104	106	108	110	111	113	122	131	140	149	157	165	174	182	190	198		
150	101	103	105	106	108	109	111	113	115	116	117	126	135	146	153	161	169	177	185	192	199		
160	107	109	110	112	113	115	116	118	120	121	122	130	138	146	154	162	170	178	186	194	200		
170	113	115	116	118	119	120	121	123	124	125	126	134	143	148	156	164	172	180	187	193	203		
180	119	121	122	123	125	126	127	129	129	130	131	138	145	153	160	167	174	181	188	196	203		
190	125	127	128	129	130	132	133	134	135	136	137	144	150	157	164	171	177	183	189	197	204		
200	131	132	134	135	136	137	139	140	141	142	143	149	156	163	170	176	181	186	192	198	203		
210	137	138	139	141	142	143	144	145	147	148	149	154	160	166	172	177	183	188	193	199	206		
220	142	143	144	145	147	148	149	150	151	152	158	164	170	176	181	187	192	197	202	207			
230	147	148	149	150	151	152	154	155	156	157	158	163	168	173	178	184	189	194	199	204	209		
240	152	153	154	155	156	157	158	159	160	161	162	167	173	178	183	189	194	198	202	207	212		
250	157	158	159	160	161	162	163	164	165	167	168	172	177	181	186	191	196	201	205	209	214		
260	162	163	164	165	166	167	168	169	170	171	172	177	181	185	189	193	197	202	207	211	216		
270	167	168	169	170	171	172	173	174	175	176	177	181	185	189	193	197	201	205	208	212	218		
280	172	173	174	175	176	177	178	179	180	181	186	190	194	198	202	206	210	214	217	221	221		
290	178	179	180	181	182	183	184	185	186	187	191	195	199	203	206	210	214	218	221	224	224		
300	183	183	184	185	186	187	188	189	190	191	192	195	198	201	204	208	212	216	220	224	227		
350	204	204	205	205	207	208	209	209	210	211	212	215	218	221	224	227	231	235	238	241	244		
400	226	226	227	228	229	229	230	230	231	232	232	235	238	241	244	247	250	253	256	259	262		
450	247	247	248	249	249	250	250	251	252	252	253	256	258	261	264	267	269	272	275	278	280		
500	266	266	267	268	268	269	269	270	270	271	271	274	276	278	281	283	286	288	291	294	295		
550	285	285	286	286	287	287	288	288	289	289	290	292	294	296	298	300	302	304	306	308	310		
600	305	305	306	306	307	307	308	308	309	309	311	313	315	316	317	319	320	322	323	325			
700	342				343			344			345	346	347	348	349	350	351	352	354	355	356		
800	378				379			380			381	382	383	384	385	386	387	388	389	390	391		
900	412				413			414			415	416	417	418	419	420	421	422	423	424			
1000	448				449			450			451	452	453	454	455	456	457	458	459	460			
1100	488				489			490			491	492	493	494	495	496	497	498	499				
1200	528						529				530	531	532	533	534	535	536	537	538	539			

2. Производим расчет теплофизических свойств горячего газа. Необходимые для расчета свойства воздуха и водяного пара приведены в табл. 3 и 4 [7].

Сначала определяем теплоемкость:

$$c_{pr} = c_{p1} g_1 + c_{p2} g_2, \quad (43)$$

где c_{p1} и c_{p2} - теплоемкости паров воды и воздуха; g_1 и g_2 - массовые доли.

Так как температура горячего газа на выходе T_r'' неизвестна и, соответственно, неизвестна средняя температура горячего газа $\bar{T}_r = 0,5(T_r' + T_r'')$, рассчитываем c_{pr} для нескольких значений $\bar{T}_r = 1000 \dots 1400$ К. Затем, используя соотношение

$$Q = G_r c_{pr} (T_r' - T_r'') = 2G_r c_{pr} (T_r' - \bar{T}_r), \quad (44)$$

находим нужное значение \bar{T}_r , а потом и T_r'' . Для средней температуры горячего газа \bar{T}_r находим значения теплофизических свойств, используя известные соотношения для смеси газов.

Молекулярная масса смеси газов

$$M_r = \frac{1}{\frac{g_1}{M_1} + \frac{g_2}{M_2}}, \quad (45)$$

где $M_1 = 18$ кг/моль, $M_2 = 28,95$ кг/моль - молекулярные массы водяного пара и воздуха.

Объемные доли водяного пара и воздуха в смеси газов

$$\tau_1 = \frac{g_1}{M_1} / \left(\frac{g_1}{M_1} + \frac{g_2}{M_2} \right); \quad \tau_2 = \frac{g_2}{M_2} / \left(\frac{g_1}{M_1} + \frac{g_2}{M_2} \right). \quad (46)$$

Газовая постоянная смеси газов

$$R_r = g_1 R_1 + g_2 R_2 \text{ Дж/(кг·К)}, \quad (47)$$

где $R_1 = 462$ Дж/(кг·К), $R_2 = 287$ Дж/(кг·К) - газовые постоянные для водяного пара и воздуха.

Средняя плотность смеси газов

$$\bar{\rho}_r \approx \frac{\bar{p}_r}{R_r \bar{T}_r} \text{ кг/м}^3, \quad (48)$$

где $\bar{T}_r = 0,5(T_r' + T_r'')$, $\bar{p}_r = \frac{p_r'(1 + G_r)}{2}$ - средние значения температуры и давления.

Коэффициент теплопроводности смеси газов [8]

$$\lambda_r = \frac{\lambda_1}{1 + A_{12} \frac{\tau_2}{\tau_1}} + \frac{\lambda_2}{1 + A_{21} \frac{\tau_1}{\tau_2}}, \quad (49)$$

где λ_1 и λ_2 - коэффициенты теплопроводности водяного пара и воздуха при температуре \bar{T}_r , определяем по табл. 3 и 4 или по формулам

Таблица 3

Теплофизические свойства сухого воздуха при $p = 0,0981$ МПа

$t, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$c_p, \text{кДж/(кг}\cdot\text{К)}$	$\lambda \cdot 10^3, \text{Вт/(м}\cdot\text{К)}$	$\mu \cdot 10^6, \text{Па}\cdot\text{с}$	$\alpha \cdot 10^4, \text{м}^2/\text{с}$	$\nu \cdot 10^4, \text{м}^2/\text{с}$	Pr
-50	1,532	1,00	2,05	14,53	13,4	9,49	0,71
-20	1,350	1,00	2,28	16,15	16,8	11,97	0,71
0	1,251	1,00	2,44	17,19	19,4	13,75	0,71
10	1,207	1,00	2,51	17,69	20,7	14,66	0,71
20	1,166	1,00	2,58	18,19	22,0	15,61	0,71
30	1,127	1,00	2,65	18,68	23,4	16,58	0,71
40	1,091	1,00	2,72	19,16	24,8	17,57	0,71
50	1,057	1,00	2,79	19,63	26,3	18,58	0,71
60	1,026	1,01	2,86	20,10	27,6	19,60	0,71
70	0,996	1,01	2,92	20,56	29,2	20,65	0,71
80	0,967	1,01	2,99	21,02	30,6	21,74	0,71
90	0,941	1,01	3,06	21,47	32,2	22,82	0,71
100	0,916	1,01	3,12	21,90	33,6	23,91	0,71
120	0,869	1,01	3,24	22,77	36,9	26,21	0,71
140	0,827	1,02	3,37	23,61	40,0	28,66	0,71
160	0,789	1,02	3,49	24,44	43,3	31,01	0,71
180	0,754	1,02	3,62	25,24	46,9	33,49	0,71
200	0,722	1,03	3,74	26,01	50,6	36,03	0,71
250	0,6530	1,03	4,06	27,91	60,0	42,75	0,71
300	0,5960	1,05	4,37	29,71	70,0	49,87	0,71
350	0,5482	1,06	4,64	31,42	80,0	57,33	0,72
400	0,5075	1,07	4,91	33,09	90,6	65,22	0,72
500	0,4418	1,09	5,45	36,15	113	81,85	0,72
600	0,3912	1,11	5,98	39,05	137	99,80	0,73
700	0,3510	1,13	6,47	41,74	162	118,95	0,73
800	0,3183	1,16	7,00	44,29	190	139,18	0,73
900	0,2916	1,17	7,40	46,68	216	160,14	0,74
1000	0,2683	1,18	7,84	48,99	247	182,67	0,74
1100	0,2477	1,20	8,26	51,20	277	205,94	0,74
1200	0,2319	1,21	8,66	53,36	309	230,17	0,74

Таблица 4

Свойства водяного пара при атмосферном давлении [7]

$t, ^\circ\text{C}$	$c_p,$ кДж/(кг·К)	$\lambda \cdot 10^3,$ Вт/(м·К)	$\mu \cdot 10^6,$ Н·с/м ²	Pr
100	2,038	23,4	12,0	1,06
200	1,975	33,5	15,9	0,94
300	2,010	44,2	20,0	0,91
400	2,068	55,9	24,2	0,90
500	2,132	68,4	28,6	0,90
600	2,200	81,8	33,1	0,89
700	2,270	96,6	37,9	0,90
800	2,341	110	42,6	0,91
900	2,420	124	47,5	0,92
1000	2,487	141	52,4	0,92

$$\lambda_1 = 1,508 \cdot 10^{-2} \left(\frac{\bar{T}_r}{T_0} \right)^{2,48} \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}; \quad (50)$$

$$\lambda_2 = 2,436 \cdot 10^{-2} \left(\frac{\bar{T}_r}{T_0} \right)^{0,82} \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}, \quad (51)$$

где $T_0 = 273,15$ К;

$$A_{12} = \frac{1}{4} \left\{ 1 + \left[\frac{\mu_1(M_2)}{\mu_2(M_1)} \frac{3/4(1 + \frac{S_1}{\bar{T}_r})}{(1 + \frac{S_2}{\bar{T}_r})} \right]^{1/2} \right\} \frac{(1 + \frac{S_{12}}{\bar{T}_r})}{(1 + \frac{S_1}{\bar{T}_r})}; \quad (52)$$

$$A_{21} = \frac{1}{4} \left\{ 1 + \left[\frac{\mu_2(M_1)}{\mu_1(M_2)} \frac{3/4(1 + \frac{S_2}{\bar{T}_r})}{(1 + \frac{S_1}{\bar{T}_r})} \right]^{1/2} \right\} \frac{(1 + \frac{S_{12}}{\bar{T}_r})}{(1 + \frac{S_2}{\bar{T}_r})}; \quad (53)$$

$S_1 = 1,5 T_{S_1}$; $S_2 = 1,5 T_{S_2}$; S_{12} - постоянные Садерленда;
 $T_{S_1} = 373$ К; $T_{S_2} = 78,81$ К - температуры кипения воды и воздуха
 при нормальном давлении; для смеси водяного пара и воздуха

$$S_{12} = 0,733 \sqrt{S_1 S_2}; \quad (54)$$

μ_1 и μ_2 - коэффициенты динамической вязкости водяного пара
 и воздуха при температуре \bar{T}_r , определяемые по табл. 3 и 4 или
 по формулам

$$\mu_1 = 8,232 \cdot 10^{-6} \left(\frac{\bar{T}_r}{T_0} \right)^{1,2} \text{ Н}\cdot\text{с/м}^2; \quad (55)$$

$$\mu_2 = 17,15 \cdot 10^{-6} \left(\frac{\bar{T}_r}{T_0} \right)^{0,68} \text{ Н}\cdot\text{с/м}^2, \quad (56)$$

где $T_0 = 273,15$ К.

Численные значения коэффициентов A_{12} и A_{21} для температур
 $\bar{T}_r = 600 \dots 2300$ К приведены в табл. 5.

Коэффициент динамической вязкости смеси газов [9]

$$\mu_r = \frac{\mu_1}{1 + \varphi_{12} \frac{\mu_2}{\mu_1}} + \frac{\mu_2}{1 + \varphi_{21} \frac{\mu_1}{\mu_2}}, \quad (57)$$

где

$$\varphi_{12} = \frac{\left[1 + \left(\frac{\mu_1}{\mu_2} \right)^{1/2} \left(\frac{M_2}{M_1} \right)^{1/4} \right]^2}{\sqrt{2} \left(1 + \frac{M_1}{M_2} \right)^{1/2}}; \quad (58)$$

$$\varphi_{21} = \frac{\left[1 + \left(\frac{M_2}{M_1} \right)^{1/2} \left(\frac{M_1}{M_2} \right)^{1/4} \right]^2}{4 \sqrt{2} \left(1 + \frac{M_2}{M_1} \right)^{1/2}} \quad (59)$$

Численные значения коэффициентов φ_{12} и φ_{21} приведены в табл. 5.

Т а б л и ц а 5
Численные значения коэффициентов A_{12} , A_{21} , φ_{12} , φ_{21}
при различных \bar{T}_r

T, K	600	700	800	900	1000	11000	1200	1300
A_{12}	0,824	0,871	0,913	0,951	0,987	1,020	1,052	1,081
A_{21}	0,921	0,898	0,878	0,861	0,845	0,832	0,819	0,809
φ_{12}	0,977	1,016	1,051	1,084	1,114	1,143	1,170	1,196
φ_{21}	1,017	0,975	0,942	0,913	0,889	0,868	0,849	0,832

T, K	1400	2100	2200	2300	2400	2500
A_{12}	1,109	1,2751	1,2959	1,3157	1,335	1,424
A_{21}	0,798	0,7427	0,7365	0,7307	0,7252	0,701
φ_{12}	1,221	1,3696	1,3882	1,4064	1,4241	1,5067
φ_{21}	0,817	0,7427	0,7349	0,7275	0,7205	0,6909

Число Прандтля для смеси газов

$$Pr_r = \frac{M_r C_{pr}}{\lambda_r} \quad (60)$$

3. Находим среднелогарифмический температурный напор для противотока:

$$\Delta \bar{T}_{\text{лог прот}} = \frac{(T_r' - T_x'') - (T_r'' - T_x')}{\ln \frac{T_r' - T_x''}{T_r'' - T_x'}} \quad (61)$$

Среднелогарифмический температурный напор для данной перекрестной схемы теплообменного аппарата будет

$$\Delta \bar{T}_{\text{лог}} = \Delta \bar{T}_{\text{лог прот}} \Psi \quad (62)$$

Здесь Ψ - поправка на число ходов, определяемая по номограммам [4], приведенным на рис. 5, где $\rho = \frac{T_x'' - T_x'}{T_r' - T_r''}$ и $R = \frac{T_r' - T_r''}{T_x'' - T_x'}$.

4. Находим среднюю температуру нагреваемого водорода:

$$\bar{T}_x = \bar{T}_r - \Delta T_{\text{лог}} \quad (63)$$

5. Для дальнейших расчетов необходимо определить отношение диаметра диафрагмы к внутреннему диаметру труб d_B / D_B и шаг их размещения t / D_B . Оптимальные параметры накатки труб находятся в диапазоне $d_B / D_B = 0,94 \dots 0,95$, $t / D_B = 0,25 \dots 0,5$. Зная d_B / D_B и t / D_B , по табл. 1 находим значения $(Nu / Nu_{\text{гл}})_{Re_x}$ и $(\xi / \xi_{\text{гл}})_{Re_x}$ для течения водорода внутри труб. Поскольку число Рейнольдса в трубах Re_x заранее неизвестно, можно предварительно принять $Re_x = 10^5$. Значения $(Nu / Nu_{\text{гл}})_{Re_x}$ и $(\xi / \xi_{\text{гл}})_{Re_x}$ для межтрубного пространства получаем по (34).

По формуле (39) определяем коэффициент $\xi_{\text{сопр } r}$. Значения коэффициентов C_2 и C_3 приведены на рис. 3. Величину ΔT_r находим из (19) по заданному значению $N_{\alpha} = \alpha_x / \alpha_r = 3 \dots 6$ (или предварительно определяем N_{α} по (21)). Затем по (20) находим число Рейнольдса для межтрубного пространства Re_r .

6. Определяем площадь проходного сечения в межтрубном пространстве:

$$S_r = \frac{G_r D_H}{Re_r M_r} m^2 \quad (64)$$

7. Находим среднюю скорость газа в межтрубном пространстве:

$$\bar{w}_r = \frac{G_r}{S_r \rho_r} \text{ м/с.} \quad (65)$$

8. По формуле (32) находим α_r .

9. Находим коэффициент теплоотдачи в трубах, воспользовавшись заданным заранее отношением α_x к α_r , т.е. $\alpha_x = N_{\alpha} \alpha_r$.

10. Определяем число Нуссельта для течения внутри труб:

$$Nu_x = \frac{\alpha_x D_B}{\lambda_x} \quad (66)$$

где коэффициент теплопроводности водорода λ_x находим по температуре \bar{T}_x с помощью табл. 2. По формуле (31) находим число Рейнольдса для течения внутри труб Re_x . Число Прандтля $Pr_x = \frac{\lambda_x c_{px}}{\alpha_x}$ для водорода определяем при температуре \bar{T}_x и давлении $p_x = \frac{\lambda_x \Delta p}{2}$, при этом значения λ_x , c_{px} , M_x берем из табл. 2.

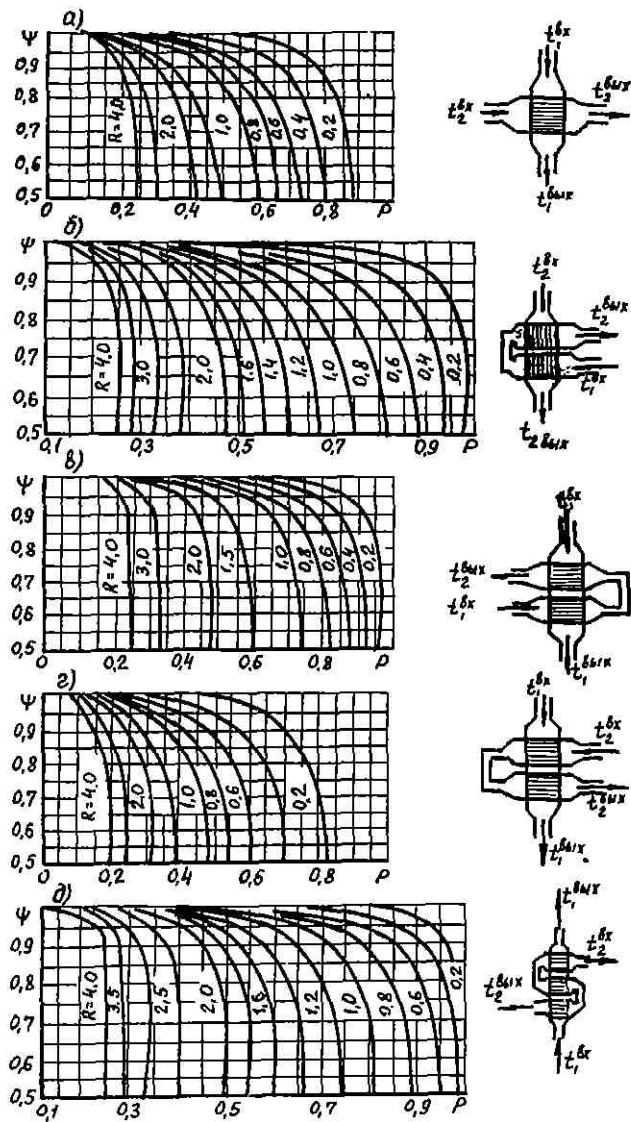


Рис. 5. Коэффициент Ψ для различных схем теплообменных аппаратов

II. Определяем число труб теплообменника (с учетом числа ходов):

$$N = \frac{4m \times G_x}{\pi D_B m_x Re_x} \quad (67)$$

12. Находим проходное сечение внутри труб:

$$S_x = \frac{N \pi D_B^2}{m_x 4} \text{ м}^2. \quad (68)$$

13. Определяем коэффициент теплопередачи, отнесенный к наружной поверхности труб:

$$K = \frac{1}{\frac{D_H}{\alpha_x D_B} + \frac{D_H}{2 \lambda_{CT}} + \frac{D_H}{D_B} \frac{1}{\alpha_r}} \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}, \quad (69)$$

где λ_{CT} - коэффициент теплопроводности материала труб.

Принимаем $\lambda_{CT} = 20 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$.

14. Находим поверхность теплообмена, определенную по D_H :

$$F' = \frac{Q}{K \cdot \Delta T_{лог}} \text{ м}^2. \quad (70)$$

15. Воспользовавшись (8), (9) и $N = \frac{ab}{S_1 S_2}$, находим габаритные размеры теплообменника:

$$c = \frac{F'}{\pi D_H N} \text{ м}; \quad (71)$$

$$a = \frac{S_r S_1}{c(S_1 - D_H)} \text{ м}; \quad (72)$$

$$b = \frac{N S_1 S_2}{a} \text{ м}. \quad (73)$$

16. Определяем число рядов по ходу газа:

$$z_2 = \frac{b}{S_2} = \frac{N S_1}{a}. \quad (74)$$

Уточняем коэффициенты C_x и C_x' .

17. Проверяем гидравлические потери в межтрубном пространстве:

$$\Delta p_r = C_2 C_3 (z_2 + 1) Re_r^{-0,27} \bar{\rho}_r \bar{w}_r^2 \left(\frac{z_2}{3 \pi} \right) Re_r + \bar{\rho}_r^2 \bar{w}_r^2 R_r \left(\frac{T_r''}{\rho_r''} - \frac{T_r'}{\rho_r'} \right) \text{ Н/м}^2, \quad (75)$$

где $\rho_r'' = \rho_r$, ρ_r' - давление на выходе.

Сопоставляем полученное значение Δp_r с заданным Δp_{r3} .

Расхождение не должно превышать $\pm(5...10)\%$.

18. Определяем среднюю скорость водорода в трубах:

$$\bar{w}_x = \frac{G_x}{\frac{N \cdot \pi D_B^2}{4 m_x} \bar{\rho}_x} \quad \text{м/с.} \quad (76)$$

Среднюю плотность водорода определяем при $\bar{\rho}_x = \rho'_x - \frac{\Delta p_x}{2}$ и температуре \bar{T}_x по табл. 2.

19. Находим потери давления на трение внутри труб:

$$\Delta p_{x \text{ тр}} = \xi_x \frac{m_x c \bar{\rho}_x \bar{w}_x^2}{2 D_B} \quad \text{Н/м}^2, \quad (77)$$

где ξ_x получаем по (38), а $(\xi/\xi_{г\lambda})_x$ при известном Re_x - по табл. I.

20. Определяем потери на местные сопротивления:

$$\Delta p_{x \text{ мест}} = \xi_{вх} \frac{\rho'_x \bar{w}_{x \text{ в}}^2}{2} + \xi_{суж} \frac{\rho'_x \bar{w}_x^2}{2} + (m_x - 1) \xi_{пов} \frac{\bar{\rho}_x \bar{w}_x^2}{2} + \xi_{расш} \frac{\rho''_x \bar{w}_x^2}{2} + \xi_{вых} \frac{\rho''_x \bar{w}_x^2}{2} \quad \text{Н/м}^2. \quad (78)$$

Здесь ρ'_x и ρ''_x - плотности водорода на входе и выходе (находятся с помощью табл. I, соответственно, по ρ'_x , T'_x и $\rho''_x = \rho'_x - \Delta p_x$, T''_x); w'_x , w''_x - скорости водорода внутри труб на входе и выходе;

$w'_{x \text{ в}}$, $w'_{x \text{ в}}$ - скорости водорода во входном и выходном патрубках;

$\xi_{вх}$, $\xi_{вых}$, $\xi_{суж}$, $\xi_{расш}$, $\xi_{пов}$ - соответственно коэффициенты местных сопротивлений входа, выхода (патрубков), сужения при входе потока в трубы, расширения при выходе потока из труб, поворота. Коэффициенты $\xi_{вх}$, $\xi_{вых}$, $\xi_{суж}$, $\xi_{расш}$ зависят от отношения меньшей и большей площадей проходных сечений канала S_M/S_B . Эти коэффициенты можно определить по графикам, приведенным на рис. 6 [4], или по формулам

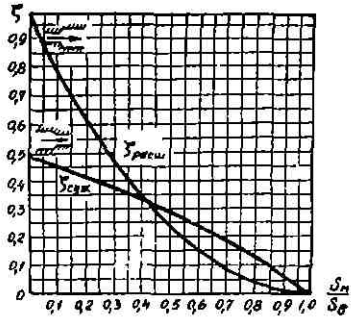


Рис. 6. Коэффициенты местных сопротивлений сужения и расширения в зависимости от

$$\xi_{суж} = 0,5 \left(1 - \frac{S_M}{S_B}\right)^{3/4}; \quad (79)$$

$$\xi_{расш} = \left(\frac{S_M}{S_B}\right)^2 - 2\left(\frac{S_M}{S_B}\right) + 1. \quad (80)$$

Для входа потока в трубы и выхода из них при размещении последних в пучке с шагами S_1 и S_2 получаем

$$\frac{S_M}{S_B} = \frac{\pi D_B^2}{4 S_1 S_2}. \quad (81)$$

Для определения $\xi'_{вх}$, $\xi'_{вых}$, $w'_{x \text{ в}}$, $w'_{x \text{ в}}$ необходимо задать площади проходных сечений входного и выходного патрубков ($F_{вх. \text{ п}}$ и $F_{вых. \text{ п}}$). Их можно принять равными площадям проходного сечения внутри труб, т.е.

$$S_{вх. \text{ п}} = S_{вых. \text{ п}} = \frac{N \pi D_B^2}{4 m_x}. \quad (82)$$

Тогда $\xi'_{вх} = \xi'_{расш}$ и $\xi'_{вых} = \xi'_{суж}$, а также $w'_{x \text{ в}} = w'_x$, $w'_{x \text{ в}} = w'_x$. Коэффициент сопротивления поворота принимаем равным $\xi_{пов} = 1,52$.

21. Находим потери давления на ускорение потока:

$$\Delta p_{x \text{ уск}} = \rho'_x \bar{w}_x'^2 - \rho''_x \bar{w}_x''^2 \quad \text{Н/м}^2. \quad (83)$$

22. Определяем полные потери давления по холодной стороне теплообменника:

$$\Delta p_x = \Delta p_{x \text{ тр}} + \Delta p_{x \text{ мест}} + \Delta p_{x \text{ уск}} \quad \text{Н/м}^2. \quad (84)$$

23. Полученное значение Δp_x сопоставляем с заданным значением Δp_{x3} . Если N_{α} определялось по (21), то расхождение не должно превышать $\pm(10...15)\%$. Если N_{α} не рассчитывалось, а задавалось, то расхождение может быть большим. Если $\Delta p_x > \Delta p_{x3}$, то повторяем расчет по пунктам 5 - 22 для меньшего значения N_{α} . Знание двух значений Δp_x в зависимости от N_{α} позволяет достаточно точно определить N_{α} , сопоставляя кривую $\Delta p_x(N_{\alpha})$ с заданным значением Δp_{x3} . Для окончательно найденного значения N_{α} повторяем расчеты по пунктам 5 - 22. Если $\Delta p_x < \Delta p_{x0}$, то расчеты по пунктам 5 - 22 повторяем для большего значения N_{α} . Количество расчетов надо согласовать с руководителем работы.

24. Определяем максимальную температуру стенок труб

$$T_{ст \text{ max}} = T'_r - (T'_r - T'_x) \frac{K}{\alpha_r} \quad (85)$$

и подбираем для них материал, используя данные, приведенные в табл. 6.

25. Компоуем теплообменный аппарат внутри трубы диаметром D_{max} (см. рис. 2). Теплообменник размещаем на конической поверхности, средний диаметр которой $D_{cp} = \frac{a}{2 \pi}$. Рисуем эскиз рассчитанного теплообменного аппарата, обозначая при этом его входные и выходные патрубки и габаритные размеры.

Т а б л и ц а 6
Свойства сталей, применяемых для изготовления труб,
работающих при высоких температурах [10]

Марка стали	T_{max} , К	T , К	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_{1000} , МПа	λ , Вт/(м·К)
12Х18Н9	1073	873	350	120	100	26,8
		923	280	120	50	-
		973	270	120	15	25,9
15Х25Т (ЭИ439)	1273	1073	-	-	18	-
		1173	-	-	8	-
		1248	-	-	3,8	-
		1273	-	-	2,5	-
10Х18Н18104Д (ЭП841)	1373	1073	200	190	-	23,0
		1173	110	100	-	-
		1273	60	50	-	-
		1373	30	25	-	-
ХН60Ю (ЭИ559)	1373	1073	230	220	45	40,2
		1173	110	-	16	-
		1273	70	-	6,5	-
		1473	20	-	2,0	-
ХН7010 (ЭИ652)	1473	1073	360	-	50	24,8
		1173	150	-	18	25,9
		1273	86	-	8	-
		1373	38	-	4	-
		1473	24	-	2,2	-

Примечание. σ_B - временное сопротивление;
 $\sigma_{0,2}$ - условный предел текучести при остаточной деформации 0,2 %;
 σ_{1000} - предел длительной прочности за 1000 ч.

ЛИТЕРАТУРА

1. Теория воздушно-реактивных двигателей/ Под ред. С.М. Шляхтенко. - М.: Машиностроение, 1975.
2. Курзинер Р.И. Реактивные двигатели для больших сверхзвуковых скоростей полета: основы теории. - М.: Машиностроение, 1977.
3. Дрейцер Г.А. Компактные теплообменные аппараты: Учебное пособие. - М.: МАИ, 1986.
4. Кутателадзе С.С., Борیشانский В.М. Справочник по теплопередаче. - М.-Л.: Госэнергоиздат, 1959.
5. Калинин Э.К., Дрейцер Г.А., Ярхо С.А. Интенсификация теплообмена в каналах. - М.: Машиностроение, 1981.
6. Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. - М.: Наука, 1972.
7. Теплофизический справочник. - М.: Энергия, 1976. - Т.2.
8. Цедерберг Н.В. Теплопроводность газов и жидкостей. - М.: Госэнергоиздат, 1963.
9. Голубев И.Ф. Вязкость газов и газовых смесей. - М.: Физматгиз, 1959.
10. Масленников С.Б. Жаропрочные стали и сплавы: Справочник. - М.: Металлургия, 1982.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Условные обозначения	4
Общие сведения	5
Исходные данные для расчета	6
I. Методика расчета теплообменного аппарата при заданном гидравлическом сопротивлении	8
2. Интенсификация теплообмена при течении теплоносителя в каналах	12
3. Порядок расчета	16
Литература	35

Тем. план 1988, поз. 12

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К КУРСОВОЙ РАБОТЕ "РАСЧЕТ РЕГЕНЕРАТИВНОГО ТЕПЛООБМЕННОГО АППАРАТА ПВВРД"

Автор-составитель
Генрих Александрович Дрейцер

Редактор Р.М. Белозерова
Техн.редактор Е.А. Смирнова
Подписано к печати 29.12.87
Формат 60x84 1/16. Бум.типогр. № 2
Усл.печ.л. 2,25; уч.-изд.л. 2,50. Тираж 500
Зак. № 3/2064. Цена 15 р.
Ротапринт МАИ
125871, Москва, Волоколамское шоссе, 4