

МОСКОВСКИЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
(Технический Университет)

---

На правах рукописи

Орлов Константин Александрович

ИССЛЕДОВАНИЕ СХЕМ ПАРОГАЗОВЫХ УСТАНОВОК  
НА ОСНОВЕ РАЗРАБОТАННЫХ ПРИКЛАДНЫХ ПРОГРАММ  
ПО СВОЙСТВАМ РАБОЧИХ ТЕЛ

Специальность 05.14.14 – Тепловые электрические станции,  
их энергетические системы и агрегаты

Диссертация  
на соискание ученой степени кандидата технических наук

Москва, 2004 г.

### **3. Расчет свойств газов и их смесей**

#### **3.1. Введение**

В настоящее время теплотехнические расчеты выполняются, как правило, с использованием компьютерной техники. При этом используются как, традиционно, языки программирования Fortran, C, Basic, Delphi, так и современные специализированные программы Mathcad, Matlab, Maple и т.д. [36, 37]. В этом случае весьма эффективным является применение прикладных программ для определения свойств рабочих веществ, таких как вода и водяной пар, продукты сгорания топлив, различных газов, хладагентов и т.д. Примером такой программы служит программа расчета свойств воды и водяного пара при различных входных переменных [1-3], описанная в главе 2.

Актуальным является создание аналогичной программы для расчета свойств газообразных продуктов сгорания, учитывая, что в нормативных материалах [33] они приводятся в неудобном для компьютерных расчетов табличном виде, а в популярном у теплотехников справочнике [32] содержатся уравнения для компонентов продуктов сгорания, применимые лишь для температур до 1500°C.

В данном разделе рассматриваются уравнения, алгоритмы и программа вычисления термодинамических свойств в идеально-газовом состоянии 11-ти веществ и смесей на их основе при температурах 200 – 2500 К, и определение на этой основе изобарной теплоемкости, энтальпии и энтропии продуктов сгорания топлив с учетом их термической диссоциации.

## 3.2. Методика расчета термодинамических свойств отдельных газов

### 3.2.1. Перечень используемых газов

В комплект веществ, для которых производится вычисление свойств в идеально-газовом состоянии, включены газы, наиболее часто встречающиеся при расчете процессов теплоэнергетики:

- азот  $N_2$ ;
- кислород  $O_2$ ;
- оксид углерода  $CO$ ;
- диоксид углерода  $CO_2$ ;
- водяной пар  $H_2O$ ;
- диоксид серы  $SO_2$ ;
- воздух;
- атмосферный азот;
- оксид азота  $NO$ ;
- диоксид азота  $NO_2$ ;
- аргон  $Ar$ ;
- неон  $Ne$ ;
- водород  $H_2$ .

Состав воздуха (по объему), как и в [32], принят следующим:

- азот – 78,03%;
- кислород – 20,99%;
- аргон – 0,94%;
- водород – 0,01%;
- диоксид углерода – 0,03%,

а в состав атмосферного азота (по объему) входят [32]:

- азот – 98,76%;
- аргон – 1,19%;

- водород – 0,01%;
- диоксид углерода – 0,04%.

Основные используемые константы:

- универсальная газовая постоянная:  $R = 8.31451$  Дж/(моль·К);
- молярные массы отдельных газов приведены в табл. 3.3;
- стандартное давление  $P_0 = 10^5$  Па = 1 бар = 0.1 МПа.

### 3.2.2. Расчетные зависимости

Для описания термодинамических свойств веществ и их смесей в идеально-газовом состоянии применяется, как и в [68], система уравнений, использующих единую форму уравнения для изобарной теплоемкости:

$$\frac{c_p}{R} = \sum_{i=0}^6 a_i \cdot \tau^i + \sum_{i=7}^{12} a_i \cdot \left(\frac{1}{\tau}\right)^{i-6}, \quad (3.1)$$

где  $\tau = T / T^*$  – относительная температура;  $T^* = 1000$  К;  $a_i$  – массив коэффициентов, специфичный для каждого газа;  $R$  – абсолютная газовая постоянная, Дж/моль·К.

Значения коэффициентов в массиве  $a$  для всех веществ кроме водяного пара и одноатомных газов, определенные методом наименьших квадратов по данным [69] для интервала температур 200 ÷ 2500 К, приведены в табл. 3.1. С этими коэффициентами уравнение (3.1) описывает величины из [69] со среднеквадратической погрешностью, равной для кислорода  $0,67 \cdot 10^{-5}$ , азота –  $0,23 \cdot 10^{-4}$ , диоксида углерода –  $0,60 \cdot 10^{-4}$ , оксида углерода –  $0,19 \cdot 10^{-4}$ , оксида азота –  $0,80 \cdot 10^{-5}$ , диоксида азота –  $0,54 \cdot 10^{-5}$ , диоксида серы –  $0,44 \cdot 10^{-5}$ , водорода –  $1.5 \cdot 10^{-5}$ .

**Табл. 3.1.** Коэффициенты уравнения (3.1)

$i$	$a_i$		
	N <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	CO
0	-.92984251E1	.17190127E2	.58627934E1

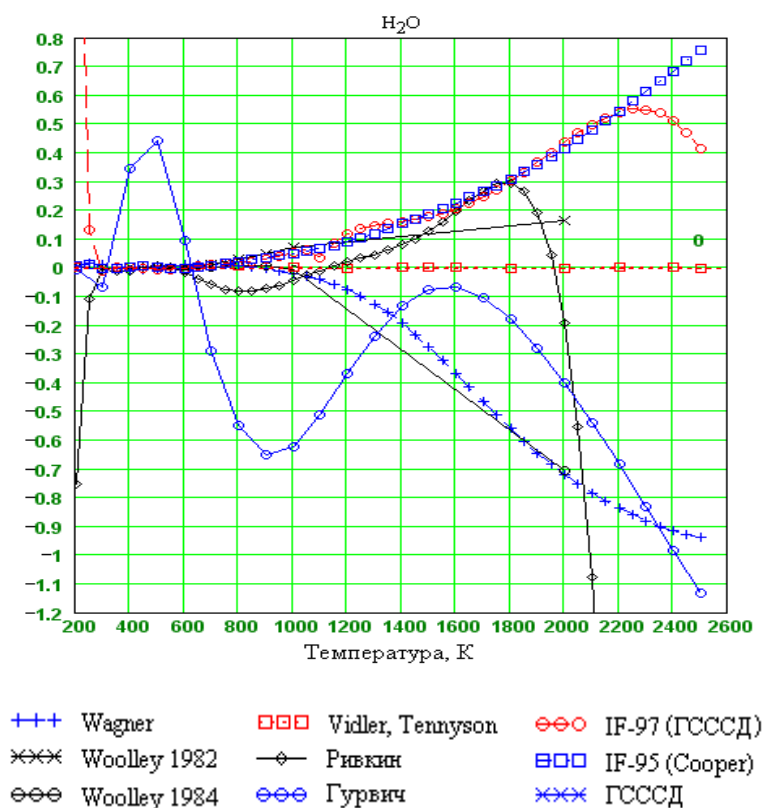
1	.20007476E2	-.11550976E2	.34431824E1
2	-.16763488E2	.70056996E1	-.48382992E1
3	.86903787E1	-.28621429E1	.30512615E1
4	-.27510686E1	.79318027E0	-.1065302E1
5	.48793873E0	-.13392554E0	.1992689E0
6	-.37167758E-1	.10209172E-1	-.15612248E-1
7	.40387289E1	-.8967597E1	-.48401746E1
8	-.30781129E0	.33796419E1	.30051634E1
9	-.19090602E0	-.76513147E0	-.97260373E0
10	.6465393E-1	.10340806E0	.17723571E0
11	-.82736889E-2	-.77090528E-2	-.17272462E-1
12	.39772373E-3	.24408174E-3	.70218924E-3
$a_i$			
$i$	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	SO <sub>2</sub>
0	-.18188731E1	3.10409601236035E+1	.129839174E2
1	.12903022E2	-3.91422080460869E+1	-.70975523E1
2	-.96634864E1	3.79695277233575E+1	.54433743E1
3	.42251879E1	-2.18374910952284E+1	-.26855652E1
4	-.1042164E1	7.42251494566339	.83220003E0
5	.12683515E0	-1.38178929609470	-.14690738E0
6	-.49939675E-2	1.08807067571454E-1	.11260596E-1
7	.24950242E1	-1.20771176848589E+1	-.28695081E1
8	-.8272375E0	3.39105078851732	-.21889887E0
9	.15372481E0	-5.84520979955060E-1	.35974571E0
10	-.15861243E-1	5.89930846488082E-2	-.92149906E-1
11	.8601715E-3	-3.12970001415882E-3	.99973132E-2
12	-.19222165E-4	6.57460740981757E-5	-.39568472E-3
$a_i$			

<i>i</i>	Воздух	N <sub>2</sub> <sup>atm</sup>	NO
0	-3.62171168554944	-9.15141475338944	.17512975E2
1	13.1878685737717	1.97612585131717E+1	-.10232606E2
2	-11.61002657829	-1.655656033537E+1	.5309077E1
3	6.1800155085671	8.5827173265771	-.1756358E1
4	-1.97996023924462	-2.71684951509762	.34469268E0
5	0.352570060264284	4.81843413354284E-1	-.33561691E-1
6	-0.026853107411115	-3.67013882440646E-2	.90748482E-3
7	1.26880226994069	3.98857888363069	-.10716017E2
8	4.69260613574416E-1	-3.04018225402584E-1	.47147653E1
9	-3.09569582156729E-1	-1.88527932068729E-1	-.12288023E1
10	7.2153490824886E-2	6.3849312595586E-2	.18787565E0
11	-8.07371553566351E-3	-8.17063504476351E-3	-.15404104E-1
12	3.61550066177588E-4	3.92763515964088E-4	.51348154E-3
<i>a<sub>i</sub></i>			
<i>i</i>	NO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	Ne, Ar
0	.22897799E2	2.68742461056112E+1	2.5
1	-.15733398E2	-3.28599322826549E+1	0
2	.10595966E2	2.92580798999686E+1	0
3	-.4722968E1	-1.59075270290400E+1	0
4	.13348353E1	5.22699862384258	0
5	-.21315607E0	-9.56104537163882E-1	0
6	.14608561E-1	7.48714373539927E-2	0
7	-.10408705E2	-1.06778768930899E+1	0
8	.30661019E1	3.07099601416186	0
9	-.49285332E0	-5.06366407292404E-1	0
10	.37617693E-1	3.43582478595844E-2	0
11	-.5705258E-3	1.16044276488724E-3	0

12	-4.6213031E-4	-2.07509179117432E-4	0
----	---------------	----------------------	---

Для изобарной теплоемкости водяного пара в идеально-газовом состоянии в Международном уравнении (IF-95) [23] используется уравнение [70], составленное по данным [71]. Однако в последующие годы проведены новые расчеты идеально-газовых величин для водяного пара [72-74], результаты которых при высоких температурах отличаются от данных [70]. Поэтому в настоящей работе для водяного пара составлено новое уравнение, основывающееся на данных [72] и описывающее их со среднеквадратической погрешностью  $0,32 \cdot 10^{-2}$ . Для воздуха и атмосферного азота коэффициенты уравнения (3.1) определены суммированием коэффициентов для компонентов с учетом их приведенной выше концентрации по методике для расчета смесей, описанной в разделе 3.4.

Расхождения величин изобарной теплоемкости, рассчитанных по уравнению (3.1), с данными некоторых других работ представлены на рис. 3.1.



**Рис. 3.1. Расхождения величин изобарной теплоемкости с данными некоторых других работ,  $(c_{p, \text{ref}} - c_p) / c_{p, \text{ref}}$ , %**

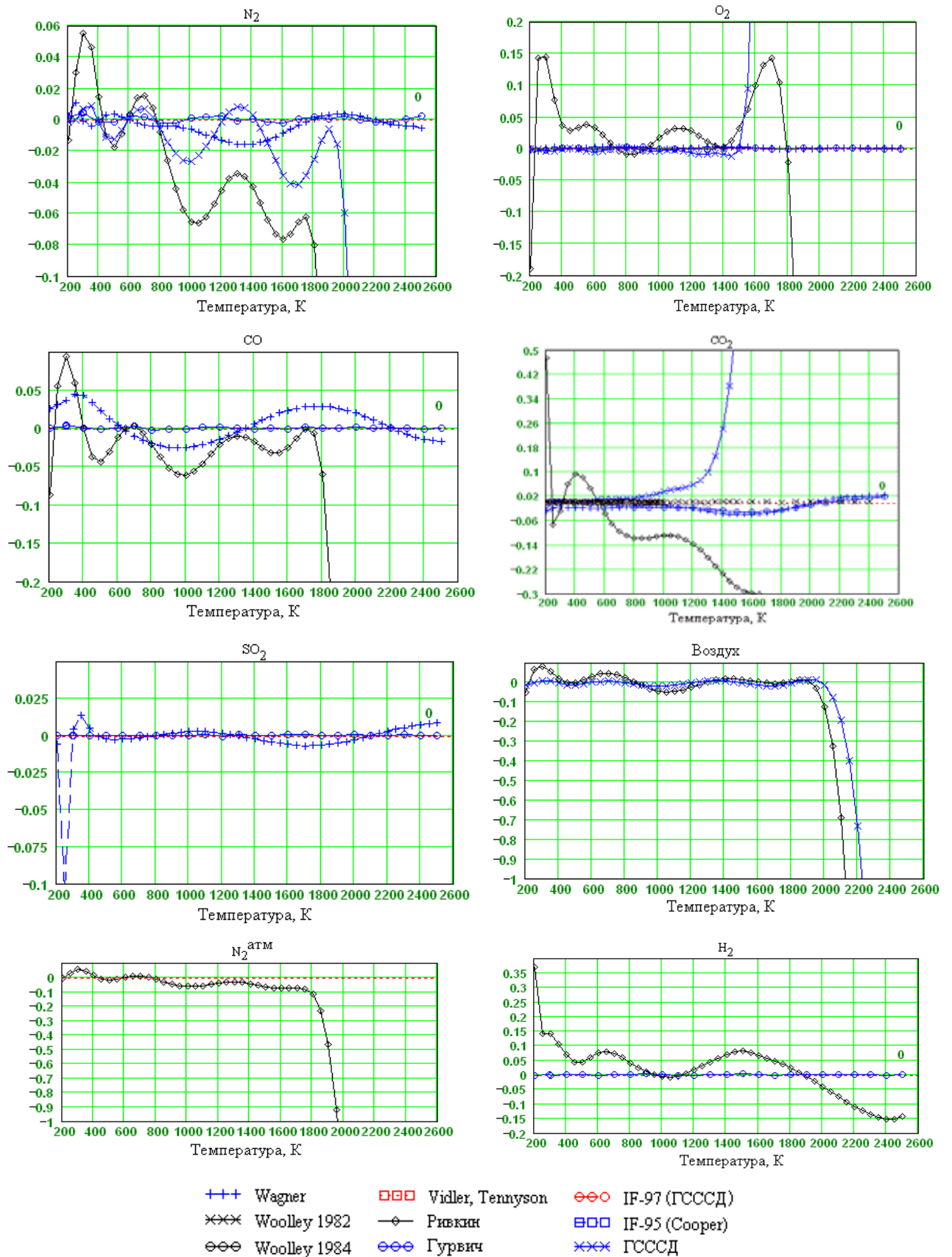


Рис. 3.1 (продолжение). Расхождения величин изобарной теплоемкости с данными некоторых других работ,  $(c_{p, ref} - c_p) / c_{p, ref} \%$



Наибольшие расхождения наблюдаются для водяного пара. При температурах до 1200 К все данные, кроме [70], согласуются между собой в пределах  $\pm 0,1\%$ . С возрастанием же температуры различие данных сильно увеличивается, причем при  $T = 2500$  К рассчитанные по [70] величины на  $0,8\%$  больше по сравнению с разработанными, а по недавно предложенному уравнению [30] – на  $0,8\%$  меньше. Для уравнения [32] в пределах области его применения (от  $-50$  до  $1500^\circ\text{C}$ ) расхождения не превышают  $0,2\%$ .

Для диоксида углерода рассчитанные по (3.1) значения во всем диапазоне температур согласуются с величинами из [30, 69, 75] с отклонениями, не превышающими  $0,04\%$ . Расхождения с [76] не превышают  $0,1\%$  только при температурах до  $1300$  К, а с [32] при  $1800$  К возрастают до  $0,4\%$ .

Для азота и кислорода очень хорошее согласование наблюдается с данными [30]: для азота в пределах  $0,016\%$ , а для кислорода –  $0,003\%$ . При температурах до  $1500$  К такое же хорошее согласование с [77] –  $0,01\%$  и с [78] –  $0,03\%$ . Несколько худшее согласование с величинами [32]: для азота –  $0,08\%$ , а для кислорода только на границах интервала расхождения превышают  $0,1\%$ . Соответственно, для воздуха при температурах до  $2000$  К расхождения с [79] не превышают  $0,02\%$ , а с [32] –  $0,06\%$ .

Хорошее согласование с [30] имеется и для диоксида серы – в пределах  $0,01\%$  и для монооксида углерода –  $0,04\%$ . Для этого же газа расхождения с [32] не превышают  $0,09\%$ .

Выражения для расчета других калорических свойств газов могут быть получены на основе уравнения (3.1) при использовании известных термодинамических соотношений. Так для расчета энтальпии получим следующее выражение:

$$\eta = T^* \cdot \left[ \sum_{i=0}^6 \frac{a_i}{i+1} \cdot \tau^{i+1} + a_7 \cdot \ln(\tau) + \sum_{i=8}^{12} \frac{a_i}{7-i} \cdot \left(\frac{1}{\tau}\right)^{i-7} \right] + \eta_{\text{int}}, \quad (3.2)$$

где  $\eta = h / R$  – относительная удельная энтальпия, К;  $R$  – удельная газовая постоянная, Дж/(К·кг);  $\eta_{\text{int}}$  – константа интегрирования, определяемая по данным табл. 3.2.

Для расчета энтропии газа при некотором давлении  $p$  справедливо соотношение

$$s = s_0 - R \cdot \ln\left(\frac{p}{p_0}\right), \quad (3.3)$$

где  $s_0$  – стандартная энтропия при давлении  $p_0 = 100$  кПа вычисляется по выражению

$$\sigma = a_0 \cdot \ln(\tau) + \sum_{i=1}^6 \left(\frac{a_i}{i} \cdot \tau^i\right) + \sum_{i=7}^{12} \frac{a_i}{6-i} \cdot \left(\frac{1}{\tau}\right)^{i-6} + \sigma_{\text{int}}, \quad (3.4)$$

в котором  $\sigma = s_0 / R$  – относительная удельная энтропия;  $\sigma_{\text{int}}$  – константа интегрирования определена по данным табл. 3.2 с учетом изменения значения стандартного давления  $p_0 = 101,325$  кПа на современное  $p_0 = 100$  кПа.

Константы интегрирования в (3.2) и (3.4) определяются по условию равенства посчитанных по ним удельных энтальпии и энтропии значениям в контрольных точках, взятых по [69]. Точка отсчета в [69] – 0 К. В табл. 3.2 приведены значения в контрольных точках.

**Табл. 3.2.** Значения в контрольных точках для определения констант интегрирования в (3.2) и (3.4) по [69]

Газ	$T_{к, л},$ К	$h_{к,},$ Дж/моль	$P_{к, с},$ К	$T_{к, с},$ К	$s_{к,},$ Дж/(моль·К)
N <sub>2</sub>	298.15	8.670E3	101325.0	298.15	191.498
O <sub>2</sub>	298.15	8.680E3	101325.0	298.15	205.035
CO	298.15	8.671E3	101325.0	298.15	197.548
CO <sub>2</sub>	298.15	9.365E3	101325.0	298.15	213.674
H <sub>2</sub> O	298.15	9.908E3	101325.0	298.15	188.724

SO <sub>2</sub>	298.15	10.548E3	101325.0	298.15	248.110
Воздух*	298.15	8.6490411E+3	101325.0	298.15	198.721001
N <sub>2</sub> <sup>атм*</sup>	298.15	8.6408291E+3	101325.0	298.15	191.637836
NO	298.15	9.179E3	101325.0	298.15	210.636
NO <sub>2</sub>	298.15	10.208E3	101325.0	298.15	240.057
Ar	298.15	6.197E3	101325.0	298.15	154.732
Ne	298.15	6.197E3	101325.0	298.15	146.214
H <sub>2</sub>	298.15	8.468E3	101325.0	298.15	130.570

\* посчитанные данные по уравнениям для смесей.

### 3.3. Программа расчета термодинамических свойств отдельных газов

#### 3.3.1. Введение

На основе зависимостей (3.1 – 3.4) была создана программа для расчетов свойств газов по методике, совпадающей с используемой при разработке программы для расчета свойств воды и водяного пара WaterSteamPro, описанной в главе 2. В настоящее время они объединены в единый пакет. Это позволяет использовать функции для расчета свойств газов во всех программах, где возможно применения пакета «WaterSteamPro».

Для расчета свойств газов в пакете определены следующие базовые функции по зависимостям (3.1 – 3.4):

$$\text{wspgCPIDT}(id, T), \quad (3.5)$$

$$\text{wspgHIDT}(id, T), \quad (3.6)$$

$$\text{wspgSIDT}(id, T), \quad (3.7)$$

$$\text{wspgSIDPT}(id, p, T), \quad (3.8)$$

где  $id$  – уникальный идентификатор газа;  $T$  – температура, К;  $p$  – давление, Па.

При расчете необходимого газа требуется указать его уникальный идентификатор. При этом программа сама по этому идентификатору найдет коэффициенты зависимостей (3.1 – 3.4). Список идентификаторов используемых газов приведен в табл. 3.3. При этом гарантируется, что в следующих версиях программы каждый газ будет иметь точно такой же уникальный идентификатор.

**Табл. 3.3.** Перечень уникальных идентификаторов газов

<i>Название газа</i>	<i>Формула газа</i>	<i>Молярная масса, кг/моль</i>	<i>Уникальный идентификатор</i>
Азот	N <sub>2</sub>	0.0280134 [69]	0
Кислород	O <sub>2</sub>	0.0319988 [69]	1
Оксид углерода	CO	0.0280104 [69]	2
Диоксид углерода	CO <sub>2</sub>	0.0440098 [69]	3
Водяной пар	H <sub>2</sub> O	0.0180152 [69]	4
Диоксид серы	SO <sub>2</sub>	0.064059 [69]	5
Воздух как единый газ *	Воздух	0.02896431986**	6
Атмосферный азот как единый газ *	N <sub>2</sub> <sup>атм</sup>	0.02815922054**	7
Оксид азота	NO	0.0300061 [69]	8
Диоксид азота	NO <sub>2</sub>	0.0460055 [69]	9
Аргон	Ar	0.039948 [69]	10
Неон	Ne	0.020179 [69]	11
Водород	H <sub>2</sub>	0.0020158 [69]	12
Воздух как смесь газов	Air <sub>mix</sub>	0.02896431986**	13
Атмосферный азот как смесь газов	N <sub>2</sub> <sup>air mix</sup>	0.02815922054**	14

\* Выражение «как единый газ» означает, что с точки зрения программы это не смесь газов, а единый газ со свойствами, эквивалентными смеси газов, его составляющих. Это позволяет рассчитывать свойства данных смесей без учета диссоциации.

\*\* Рассчитано согласно принятому объемному составу [32].

В табл. 3.3 по два раза указаны воздух и атмосферный азот. В первом случае, они выступают как единые газы, и для них в частности нельзя учесть диссоциацию, т.е. информация об их составляющих не хранится (см. раздел 3.3.5). Во втором случае – это смеси газов, для которых возможен расчет диссоциации и определение их составляющих. Это сделано для облегчения сравнения и расчетов по предложенной методике. При этом пользователь сам может выбрать, какой вариант ему больше всего подходит. Более подробное различие между смесями и отдельными газами приведено в разделе 3.5.

Помимо исходных функций (3.5 – 3.8) существуют дополнительные функции, которые возвращают:

- молярную массу, кг/моль:

$$\text{wspgMMID}(id); \quad (3.9)$$

- удельную газовую постоянную, Дж/(кг·К):

$$\text{wspgGCID}(id); \quad (3.10)$$

- удельный объем, определенный по уравнению Менделеева-Клапейрона:

$$\text{wspgVIDPT}(p, T), \quad (3.11)$$

$$\text{wspgVIDT}(T). \quad (3.12)$$

В последней функции в качестве давления используется значение стандартного.

Также в программе реализованы функции для расчета обратных зависимостей – расчет температур по удельным энтальпии или энтропии. Описание данных функций приведено в следующем разделе.

### 3.3.2. Расчет обратных зависимостей

При расчете процессов, связанных со свойствами газов часто требуется не только расчет свойств в зависимости от температуры, но и в зависимости от энтальпии и энтропии. Из уравнений (3.2) и (3.3) не могут быть явно выражены соотношения для прямого счета температуры в зависимости от удельных энтальпии и энтропии. Поэтому при обратном счете требуется решать уравнения (3.2) и (3.3) относительно температуры.

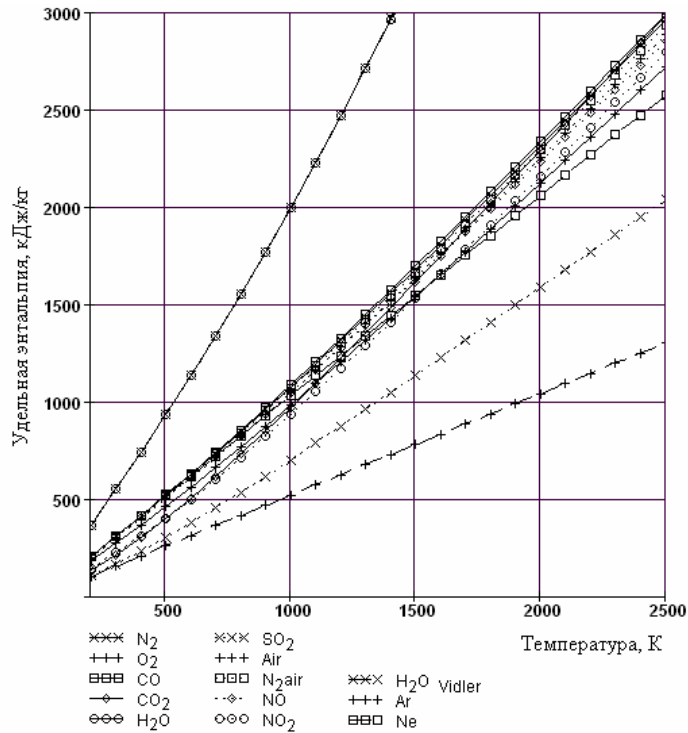
Одним из наиболее простых и быстрых методов поиска решения в рассматриваемом случае – это метод Ньютона. Для расчета необходимых производных, требующихся в данном методе, можно воспользоваться следующими термодинамическими зависимостями:

$$h'(T) = c_p(T), \quad (3.13)$$

$$s'(T) = c_p(T) / T. \quad (3.14)$$

Зависимости (3.13) и (3.14) позволяют рассчитывать значения производных и искомых параметров на каждом шаге метода Ньютона в едином цикле, что позволяет ускорить работу программы.

Метод Ньютона требует близкого начального приближения. Для этого был произведен анализ общего поведения искомых функций. На рис. 3.2 представлены графики зависимостей удельной энтальпии  $h$  от температуры  $T$  в диапазоне от 200 до 2500 К для каждого из газов.



**Рис. 3.2. Зависимость удельной энтальпии  $h$  от температуры  $T$  в диапазоне от 200 до 2500 К**

С использованием метода Ньютона для уточнения корней функций (3.2 – 3.3) были разработаны следующие функции:

$$\text{wspgTIDH}(id, h), \quad (3.21)$$

где  $id$  – идентификатор газа;  $h$  – удельная энтальпия, Дж/кг;

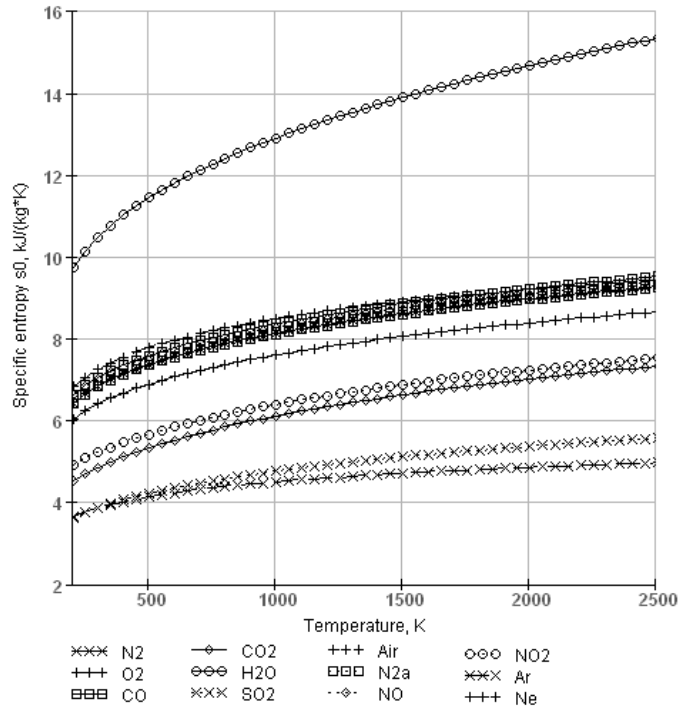
$$\text{wspgTIDS}(id, s_0), \quad (3.22)$$

где  $id$  – идентификатор газа;  $s_0$  – удельная энтропия при стандартном давлении, Дж/(кг·К);

$$\text{wspgTIDPS}(id, p, s_0); \quad (3.23)$$

где  $id$  – идентификатор газа;  $s_0$  – удельная энтропия, Дж/(кг·К), при давлении  $p$ , Па.

Данные функции позволяют быстро и легко рассчитывать процессы расширения и сжатия.



**Рис. 3.3. Зависимость удельной энтропии  $s$  от температуры в диапазоне от 200 до 2500 К**

### 3.4. Методика расчета термодинамических свойств смесей газов

Для расчета свойств смесей газов используются те же функциональные зависимости (3.1) – (3.4), что и для отдельных газов:

$$\frac{c_{P,mix}}{R} = \sum_{i=0}^6 a_{i,mix} \cdot \tau^i + \sum_{i=7}^{12} a_{i,mix} \cdot \left(\frac{1}{\tau}\right)^{i-6}, \quad (3.24)$$

$$\frac{h_{mix}}{R} = T^* \cdot \left[ \sum_{i=0}^6 \frac{a_{i,mix}}{i+1} \cdot \tau^{i+1} + a_{7,mix} \cdot \ln(\tau) + \sum_{i=8}^{12} \frac{a_{i,mix}}{7-i} \cdot \left(\frac{1}{\tau}\right)^{i-7} \right] + \frac{h_{int,mix}}{R}, \quad (3.25)$$

но в выражении для стандартной энтропии:

$$\frac{s_{0,mix}}{R} = a_{0,mix} \cdot \ln(\tau) + \sum_{i=1}^6 \left(\frac{a_{i,mix}}{i}\right) \cdot \tau^i + \sum_{i=7}^{12} \frac{a_{i,mix}}{6-i} \cdot \left(\frac{1}{\tau}\right)^{i-6} + \frac{s_{0,int,mix} + \Delta s_{0,mix}}{R} \quad (3.26)$$

появляется член, выражающий изменение энтропии при смешении газов

$$\frac{\Delta s_{0,mix}}{R} = - \sum_{j=1}^N x_j \cdot \ln(x_j). \quad (3.27)$$

При этом коэффициенты для смеси вычисляются по формуле



$$a_{i,mix} = \sum_{j=1}^N x_j \cdot a_{i,j}, \quad (3.28)$$

$$h_{int,mix} = \sum_{j=1}^N x_j \cdot h_{int,j}, \quad (3.29)$$

$$s_{int,mix} = \sum_{j=1}^N x_j \cdot s_{int,j}, \quad (3.30)$$

где  $x_j$  – молярная (или объемная) доля  $j$ -го газа, входящего в смесь, состоящую из  $N$  газов;  $a_{i,j}$  –  $i$ -й коэффициент  $j$ -го газа.

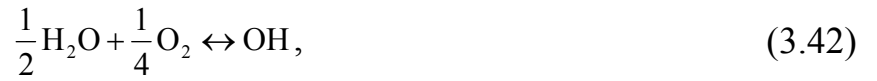
### 3.5. Методика учета диссоциации в смесях газов при высоких температурах

В описанных выше уравнениях, используемых при расчете газов и их смесей, не учитывается эффект диссоциации газов при высоких температурах. Для его определения необходим расчет химического равновесия компонентов в рассматриваемой смеси. В настоящее время существует множество, как методик расчета химического равновесия, так и программ на их основе, например [57, 61, 62], и большинство из них требуют проведения значительных итеративных расчетов для определения точного химического равновесия смеси, т.к. при этом решаются системы нелинейных уравнений.

Однако для достаточно хорошей аппроксимации калорического эффекта диссоциации в требуемом температурном диапазоне не обязательно требуется знание точного равновесного состава смеси. Поэтому для расчета его использован предложенный в [30] упрощенный метод.

Метод основывается на допущении, что для обычных условий энергетики при температурах до 2000 К основной эффект в изменение рассматриваемых свойств вносит образование продуктов следующих реакций:





Константы равновесия для этих реакций по данным [61, 62] представлены в [30] эмпирической формулой

$$K_j = A_j \exp(B_j/T), \quad (3.38)$$

коэффициенты которой  $A_j$  и  $B_j$  приведены в табл. 3.4. Далее вводятся переменные  $U_j$ , характеризующие концентрацию продуктов реакции

$$U_1 = A_1 \cdot \frac{x_{\text{CO}_2}}{\sqrt{x_{\text{O}_2}}} \cdot \left(\frac{p}{p_0}\right)^{-0.5} \cdot \exp\left(\frac{B_1}{T}\right), \quad (3.39)$$

$$U_2 = A_2 \cdot \frac{x_{\text{H}_2\text{O}}}{\sqrt{x_{\text{O}_2}}} \cdot \left(\frac{p}{p_0}\right)^{-0.5} \cdot \exp\left(\frac{B_2}{T}\right), \quad (3.40)$$

$$U_3 = A_3 \cdot \sqrt{x_{\text{H}_2\text{O}}} \cdot \sqrt[4]{x_{\text{O}_2}} \cdot \left(\frac{p}{p_0}\right)^{-0.25} \cdot \exp\left(\frac{B_3}{T}\right), \quad (3.41)$$

$$U_4 = A_4 \cdot \sqrt{U_2} \cdot \left(\frac{p}{p_0}\right)^{-0.5} \cdot \exp\left(\frac{B_4}{T}\right), \quad (3.42)$$

$$U_5 = A_5 \cdot \sqrt{x_{\text{O}_2}} \cdot \left(\frac{p}{p_0}\right)^{-0.5} \cdot \exp\left(\frac{B_5}{T}\right), \quad (3.43)$$

$$U_6 = A_6 \cdot \sqrt{x_{N_2}} \cdot \sqrt{x_{O_2}} \cdot \exp\left(\frac{B_6}{T}\right) \quad (3.44)$$

и величина

$$U_{tot} = 1 + \sum_{j=1}^6 U_j. \quad (3.45)$$

Вклад теплового эффекта каждой реакции в изобарную теплоемкость при температурах от 1000 до 2000 К представлен формулой

$$V_j = C_j + \frac{D_j}{T} + \frac{E_j}{T^2}, \quad (3.46)$$

коэффициенты которой приведены в табл. 3.4, и изменения термодинамических свойств смеси вследствие диссоциации рассчитываются как

$$\Delta^{dis} c_p^0 = \frac{1}{U_{tot}} \sum_{j=1}^6 U_j \cdot V_j, \quad (3.47)$$

$$\Delta^{dis} h^0 = -\frac{T^2}{U_{tot}} \sum_{j=1}^6 \frac{U_j \cdot V_j}{B_j}, \quad (3.48)$$

$$\Delta^{dis} s^0 = \frac{\Delta^{dis} h^0}{T} = -\frac{T}{U_{tot}} \sum_{j=1}^6 \frac{U_j \cdot V_j}{B_j}. \quad (3.49)$$

После этого свойства смеси диссоциирующих газов определяются суммированием этих величин с вычисленными по (3.24 – 3.26)

$$c_{p,dis}^0 = c_{p,mix}^0 + \Delta^{dis} c_p^0, \quad (3.50)$$

$$h_{dis}^0 = h_{mix}^0 + \Delta^{dis} h^0, \quad (3.51)$$

$$s_{dis}^0 = s_{mix}^0 + \Delta^{dis} s^0, \quad (3.52)$$

Рассмотренный метод позволяет избежать итеративных вычислений и обеспечивает высокую точность расчетов термодинамических свойств смеси диссоциирующих газов при температурах до 2000 К.

**Табл. 3.4.** Коэффициенты уравнений (3.38 – 3.44, 3.46)

№	Образование	$A_j$	$B_j, K$	$C_j,$ Дж/(моль·К)	$D_j,$ Дж/моль	$E_j,$ Дж·К/моль
1	CO	20413.2	-33086.5	-19.5	-1.15E5	9.483E9
2	H <sub>2</sub>	1075.5	-30283.3	-65.2	3.03E5	7.277E9
3	OH	165.95	-19526.8	-18.7	5.72E4	3.136E9
4	H	1491.75	-27488.0	-3.60	3.93E5	5.826E9
5	O	3235.34	-30807.8	-21.8	1.50E5	7.659E9
6	NO	4.55420	-10973.6	-5.60	1.62E4	9.940E9

Пользователь может самостоятельно настраивать режим учета эффекта диссоциации с помощью функции:

$$\text{wspgSETCALCDISSMODE}(\text{mode}), \quad (3.53)$$

где *mode* – значение режима ведения учета эффекта диссоциации. При *mode* = 0 тепловой эффект диссоциации не рассчитывается. При *mode* = 1 эффект диссоциации рассчитывается при всех температурах. При *mode* = 2 расчет производится только для температур свыше 1200 К.

### 3.6. Программа расчета свойств метана

Для расчета свойств газового топлива было принято решение использовать соответствующие уравнения для свойств метана CH<sub>4</sub>, как одного из основных составляющих природного газа, в основном используемого в ГТУ и ПГУ теплоэнергетики.

Для упрощения расчетов было принято допущение о рассмотрении метана, как идеального газа. Для расчета идеально-газовой составляющей удельной изобарной теплоемкости была взята зависимость из [80].

Данное допущение было проверено путем сравнения расчета топливного компрессора (ТК), сжимающего топливо газовой турбины от обычных параметров после ГРП до давлений в камере сгорания. В качестве эталонного значения использовались результаты расчета сжатия метана с использованием

общего уравнения состояния метана [80] как реального газа. В табл. 3.5 приведены результаты расчетов и их сравнения. Исходный документ с расчетами приведен в прил. П.2.2.

При расчете были приняты следующие исходные данные:

- топливо метан – 100 %;
- влагосодержание топлива:  $d = 0$  кг/м<sup>3</sup>;
- давление на входе в топливный компрессор 0,2 МПа;
- температура на входе в топливный компрессор 10°C;
- давление на выходе из топливного компрессора 2.0 МПа;
- внутренний относительный КПД топливного компрессора 80%.

**Табл. 3.5.** Результаты сравнения расчета топливного компрессора для метана как идеального или реального газа

Параметр	Рабочее тело CH <sub>4</sub>		Относительная погрешность определения, %
	Идеальный газ	Реальный газ	
Температура за ТК, К	501.742	502.974	0.246
Реальный теплоперепад в ТК, кДж/кг	550.72	549.380	-0.244

При расчете ПГУ, погрешность, вносимая за счет топлива, будет еще меньше, т.к. основной вклад в энергетический баланс камеры сгорания производится за счет энтальпии сгорания топлива, а не за счет энтальпии, вносимой вместе с топливом. Отношение этих энтальпий составляет примерно 1%.

Таким образом, погрешность, вносимая рассмотрением метана как идеального газа в пределах требуемого диапазона параметров мала, и ею можно пренебречь в дальнейших расчетах.

Коэффициенты и используемые зависимости для расчета термодинамических свойств метана приведены на рис. 3.5.

$a_{\text{CH}_4} = \begin{pmatrix} 146.696186 \cdot 10^0 \\ -65.6744186 \cdot 10^0 \\ 20.2698132 \cdot 10^0 \\ -4.20931845 \cdot 10^0 \\ 0.606743008 \cdot 10^0 \\ -0.0612623969 \cdot 10^0 \\ 4.30969226 \cdot 10^{-3} \\ -2.06597572 \cdot 10^{-4} \\ 6.4261581 \cdot 10^{-6} \\ -1.1680563 \cdot 10^{-7} \\ 9.4095893 \cdot 10^{-10} \end{pmatrix}$	$b_{\text{CH}_4} = \begin{pmatrix} -209.233731 \cdot 10^0 \\ 206.925203 \cdot 10^0 \\ -135.704831 \cdot 10^0 \\ 56.4368924 \cdot 10^0 \\ -13.4496111 \cdot 10^0 \\ 1.39664152 \cdot 10^0 \end{pmatrix}$	$h_{0,\text{CH}_4} = 206.393 \frac{10^3 \text{ J}}{\text{kg}}$ $s_{0,\text{CH}_4} = 9317.531 \frac{\text{ J}}{\text{kg K}}$ $R_{\text{CH}_4} = 518.277 \frac{\text{ J}}{\text{kg K}}$
Удельная изобарная теплоемкость:		
$c_{p,0,\text{CH}_4,i}(T) = \begin{cases} TR \leftarrow \frac{T}{T_{0,\text{CH}_4}} \\ c_p \leftarrow \sum_{i=0}^{10} (a_{\text{CH}_4,i} \cdot TR^i) + \sum_{i=1}^6 \left[ b_{\text{CH}_4,i-1} \cdot \left( \frac{1}{TR} \right)^i \right] \\ c_p R_{\text{CH}_4} \end{cases}$		
Удельная энтальпия:		Удельная энтропия:
$h_{0,\text{CH}_4,i}(T) = \int_{T_{0,\text{CH}_4}}^T c_{p,0,\text{CH}_4,i}(t) dt + h_{0,\text{CH}_4}$		$s_{0,\text{CH}_4,i}(T) = \int_{T_{0,\text{CH}_4}}^T \frac{c_{p,0,\text{CH}_4,i}(t)}{t} dt + s_{0,\text{CH}_4}$

**Рис. 3.5. Коэффициенты и функциональные зависимости свойств метана как идеального газа по [80]**

Исходный документ доступен в сети Internet по адресу: [http://twf.mpei.ac.ru/orlov/gases/methan\\_functions.mcd](http://twf.mpei.ac.ru/orlov/gases/methan_functions.mcd). и в приложении П.2.2.

### 3.7. Заключение

Разработанная методика и программа позволяют быстро, легко и достаточно точно производить расчет термодинамических свойств газов и смесей на их основе. Также в программе имеются мощные возможности для работы со смесями.

Сравнение получаемых результатов с данными других авторов показало хорошее согласование во всей области определения исходных уравнений для температур от 200 К до 2500 К.

Использование разработанных функций на персональном компьютере возможно в широком кругу прикладных программ.

Разработаны алгоритмы для расчета термодинамических свойств метана как идеального газа. Расчеты показали правомочность допущения об идеальности в требуемом диапазоне свойств.

## Литература

1. **Набор** программ для расчета теплофизических свойств воды и водяного пара («WaterSteamPro»). А.с. 2000610803 РФ / А.А. Александров, А.В. Очков, В.Ф. Очков, К.А. Орлов.
2. **Орлов К.А.** Программа «WaterSteamPro» // КомпьютерПресс. – 2001. – №4. – С. 2.
3. **Орлов К.А., Александров А.А., Очков В.Ф., Очков А.В.** Программный комплекс «WaterSteamPro» для расчета теплофизических свойств воды и водяного пара // X Российская Конференция по Теплофизическим Свойствам Веществ: Тез. докл. – Казань, 2002. – С. 187 – 188.
4. **Карно С.** Размышления о движущей силе огня и о машинах, способных развивать эту силу / Пер. с фр. Бурсиана В.Р., Круткова Ю.А. – Париж, 1824.
5. **Степанов И.Р.** Парогазовые установки. Основы теории, применение и перспективы. – Апатиты: изд-во Кольского научного центра РАН, 2000. – 169 с.
6. **Турбины** тепловых и атомных электрических станций: Учебник для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. / А.Г. Костюк, В.В. Фролов, А.Е. Булкин, А.Д. Трухний; Под ред. А.Г. Костюка, В.В. Фролова. – М.: Изд-во МЭИ, 2001. – 488 с.
7. **Батенин В.М., Зейгарник Ю.А., Копелев С.З. и др.** Парогазовая установка с вводом пара в газовую турбину – перспективное направление развитых энергетических установок // Теплоэнергетика. – 1993. – №10. – С. 46 – 52.
8. **А.с. 168962 СССР.** Тепловая энергетическая установка на парогазовой смеси / С.А. Христианович, В.М. Масленников и др. // Открытия. Изобретения. 1962. №5.

9. **Цанев С.В., Буров В.Д., Ремезов А.Н.** Газотурбинные и парогазовые установки тепловых электрических станций. Учебное пособие для вузов / Под ред. С.В. Цанева. – М.: Изд-во МЭИ, 2002. – 584 с.
10. **Романов В.И., Кривуца В.А.** Комбинированная газопаровая установка мощностью 16...25 МВт с утилизацией тепла уходящих газов и регенерацией воды из парогазового потока // Теплоэнергетика. – 1996. – №4. – С. 27 – 30.
11. **Batenin, V.M., Zeigarnik, Yu.A., Sokolov, Yu.N.** Combined Cycle Installation with Steam Injection and Heat Supply // Dubrovnik conference on sustainable development of energy, water and environment systems: Тез. докл. – Дубровник, 2002. – С. 90.
12. **Фаворский О.Н., Батенин В.М. и др.** Комплексная парогазовая установка с впрыском пара и теплонасосной установки (ПГУ МЭС-60) для АО «Мосэнерго» // Теплоэнергетика. – 2001. – №9. – С. 50 – 58.
13. **Стырикович М.А., Фаворский О.Н., Батенин В.М. и др.** Парогазовая установка с впрыском пара: возможности и оптимизация параметров цикла // Теплоэнергетика. – 1995. – №10. – С. 52 – 57.
14. **Новиков А.С., Мешков А.С., Миронов Ю.Р. и др.** Разработки АО «Рыбинские моторы» для стационарной энергетики // Теплоэнергетика. – 1999. – №4. – С. 20 – 27.
15. **Фаворский О.Н., Батенин В.М. и др.** Комплексная парогазовая установка с впрыском пара и теплонасосной установки (ПГУ МЭС-60) для АО «Мосэнерго» // Теплоэнергетика. – 2001. – №9. – С. 50 – 58.
16. **Беляев В.Е., Косой А.С., Листопадов Д.В., Маркелов А.П., Синкевич М.В.** Влияние расхода охлаждающего пара на характеристики парогазовых установок с впрыском пара // Теплоэнергетика. – 2002. – № 9. – С. 47 – 51.



17. **Епифанов В.М., Зейгарник Ю.А., Копелев С.З. и др.** Газопаровая установка с вводом пара в газодинамический тракт: основные научные и технические проблемы // Теплоэнергетика. – 1993. – №10. – С. 53 – 57.
18. **Korobitsyn M.A.** New and Advanced Energy Conversion Technologies. Analysis of Cogeneration, Combined and Integrated Cycles. – Enschede: Febodruk BV, 1998. – 137 с.
19. **Weston K.C.** Energy conversion. – St. Paul: West Publishing Company, 1992. – 633 с.
20. **Poullikkas A.** Mixed Air Steam Turbines Fired by Liquid Fuels / – Cyprus: Electricity Authority of Cyprus, 2003. – 58 с.
21. **Bartlett M.** Developing Humidified Gas Turbine Cycles: doctoral thesis. – Stockholm: Royal Institute of Technology, 2002. – 91 с.
22. **Dalili F.** Humidification in Evaporative Power Cycles: doctoral thesis. – Stockholm: Royal Institute of Technology, 2003. – 105 с.
23. **Release** on the IAPWS Formulation-1995 for the Thermodynamic Properties of Ordinary Water Substance for General and Scientific Use. International Association for the Properties of Water and Steam / – Frederica, 1996 – 18 с.
24. **Wagner W., Prub A.** The IAPWS Formulation 1995 for the Thermodynamic Properties of Ordinary Water Substance for General and Scientific Use // J. Phys. Chem. Ref. Data. – 2002. – №31. – С. 387 – 535.
25. **Александров А.А.** Международное уравнение состояния воды и водяного пара // Теплоэнергетика. – 1997. – № 10. – С. 68 – 72.
26. **IAPWS** Industrial Formulation 1997 for the Thermodynamic Properties of Water and Steam. International Association for the Properties of Water and Steam / – Erlangen, 1997. – 48 с.
27. **Александров А.А.** Система уравнений IAPWS-IF97 для вычисления термодинамических свойств воды и водяного пара в промышленных расчетах. Ч. 1. Основные уравнения // Теплоэнергетика. – 1998. – № 9. – С. 69 – 77.

28. **Александров А.А., Григорьев Б.А.** Таблицы теплофизических свойств воды и водяного пара. Справочник. Рек. Гос. службой стандартных справочных данных. ГСССД Р-776-98. – М.: Изд-во МЭИ, 1999. – 168 с.
29. **IAPWS Skeleton Tables 1985 for the Thermodynamic Properties of Ordinary Water Substance.** International Association for the Properties of Water and Steam / – Orlando, 1994. – 20 с.
30. **Bucker D., Span R., Wagner W.** Thermodynamic Property Models for Moist Air and Combustion Gases // ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power. – 2003. – № 125. С. 374 – 384.
31. **Расчет** показателей тепловых схем и элементов парогазовых и газотурбинных установок электростанций. Учебное пособие / С.В. Цанев, В.Д. Буров, С.Н. Дорофеев и др.; Под ред. В.В. Чижова. М.: Изд-во МЭИ, 2000. – 72 с.
32. **Ривкин С.Л.** Термодинамические свойства газов. Справочник. – 4-е изд., перераб. М.: Энергоатомиздат, 1987. – 288 с.
33. **Тепловой расчет котлов (Нормативный метод).** – 3-е изд. перераб. и доп. СПб.: Изд-во НПО ЦКТИ, 1998. – 256 с.
34. **Теплофизические свойства** технических важных газов при высоких температурах и давлениях. Справочник / В.Н. Зубарев, А.Д. Козлов, В.М. Кузнецов и др. М.: Энергоатомиздат, 1989. – 232 с.
35. **Расчет на ЭВМ** тепловых схем газотурбинных установок в составе парогазовых установок тепловых электростанций / Цанев С.В., Чухин И.М.; Под ред. И.Н. Тамбиевой. – М.: МЭИ, 1986. – 40 с.
36. **Орлов К.А.** Теплофизические свойства воды и водяного пара в Mathcad Professional // КомпьютерПресс. – 1999. – № 12. С. 2.
37. **Очков В.Ф., Утенков В.Ф., Орлов К.А.** Теплотехнические расчеты в среде Mathcad // Теплоэнергетика. – 2000. – №2. – С. 73 – 78.

38. **Теплоэнергетика** и теплотехника: Общие вопросы: Справочник / Под общ. ред. чл.-корр. РАН А.В. Клименко и проф. В.М. Зорина. – 3-е изд., перераб. – М.: Изд-во МЭИ, 1999. – 528 с.
39. **Орлов К.А., Александров А.А., Очков В.Ф., Кондакова Г.Ю., Очков А.В.** Разработка современных программных средств для расчета термодинамических свойств воды и свойств водных растворов на основе системы уравнений ISF-95 // VIII Междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов: Тез. докл. – М.: Изд-во МЭИ, 2002. – С. 183 – 185. – 3 т.
40. **Release** on the Pressure along the Melting and the Sublimation Curves of Ordinary Water Substance. The International Association for the Properties of Water and Steam / – Milan, 1993. – 5 с.
41. **Kretzschmar H-J., Stöcker I., Willkommen T., Trübenback J., Dittmann A.** Supplementary equations  $v(p, t)$  for the critical region to the new industrial formulation IAPWS-IF97 for water and steam // The 13th International Conference on Properties of Water and Steam. – Ottawa: NRC Research Press, 2000. – С. 225 – 264.
42. **IAPS** Supplementary Release: Saturation Properties of Ordinary Water Substance / – St. Petersburg, 1992. – 7 с.
43. **Guideline** on the Use of Fundamental Physical Constants and Basic Constants of Water. The International Association for the Properties of Water and Steam / – Gaithersburg, 2001. – 7 С.
44. **Supplementary** Release on Backward Equations for  $p(h, s)$  for Region 3, Equations as a Function of  $h$  and  $s$  for the Region Boundaries, and a Equation  $T_{sat}(h, s)$  for Wet Steam of the IAPWS Industrial Formulation 1997 for the Thermodynamic Properties of Water and Steam / – Kyoto: 2004. – 35 с.
45. **Supplementary** Release on Backward Equations for Pressure as a Function of Enthalpy and Entropy  $p(h, s)$  to the IAPWS Industrial Formulation 1997 for the Thermodynamic Properties of Water and Steam / – Gaithersburg, 2001. – 13 с.

46. **Supplementary** Release on Backward Equations for the Functions  $T(p, h)$ ,  $v(p, h)$  and  $T(p, s)$ ,  $v(p, s)$  for the Critical and Supercritical Regions to the IAPWS Industrial Formulation 1997 for the Thermodynamic Properties of Water and Steam / – Vejle, 2003. – 18 С.
47. **Supplementary** Release on Saturation Properties of Ordinary Water Substance. IAPWS / Proc. 12th Int, Conf. Prop. Water and Steam. – New York: Begell House, 1995. С. 143 – 149.
48. **Александров А.А.** Система уравнений IAPWS-IF97 для вычисления термодинамических свойств воды и водяного пара в промышленных расчетах. Ч. 2. Дополнительные уравнения // Теплоэнергетика. – 1998. – № 10. – С. 64 – 72.
49. **Thermodynamic** derivatives for water and steam / Solomon L. Rivkin, Aleksey A. Alexandrov, Elena A. Kremenevskaya. – Washington, D.C.: V.H. Winston & Sons, 1978. – 264 с.
50. **Release** on The Surface Tension of Ordinary Water Substance. IAPWS / Proc. 12th Int, Conf. Prop. Water and Steam. – New York: Begell House, 1995. С. 143 – 149.
51. **Release** on the IAPWS Formulation 1985 for the Thermal Conductivity of Ordinary Water Substance. IAPWS / Proc. 12th Int, Conf. Prop. Water and Steam. – New York: Begell House, 1995. С. 49 – 70.
52. **Release** on the IAPS Formulation 1985 for the Viscosity of Ordinary Water Substance. IAPWS / Proc. 12th Int, Conf. Prop. Water and Steam. – New York: Begell House, 1995. С. 33 – 48.
53. **Revised** Release on the IAPS Formulation 1985 for the Viscosity of Ordinary Water Substance / – Erlangen, 2003. – 15 с.
54. **Release** on the ion product of water substance. International Association for the Properties of Steam / – Munich, 1980. – 9 с.
55. **Computer** Aided Thermodynamic Tables (CATT) 2. Version 1.0.

56. **Icmprops**. Thermodynamic Properties of Fluids. The Center for Applied Thermodynamic Studies. College of Engineering University of Idaho, Moscow, Idaho. Version 4.2.
57. **Ivtanthermo** for Windows. Database on thermodynamic properties of individual substances and thermodynamic modeling software. V.S. Yungman at al. Version 3.0. Glushko Thermocenter of RAS. 1992-2003.
58. **Psyprops**. Psychometric Properties of Moist Air. The Center for Applied Thermodynamic Studies. College of Engineering University of Idaho, Moscow, Idaho. Version 2.1.
59. **Water** and Steam Properties (WASP) for Windows. Katmar Software. <http://www.chempute.com/wasp.htm>.
60. **Conan J.** WATR V1.0.: Water Properties by Fee University of Waikato, New Zealand.
61. **McBride B.J., Gordon S.** Computer Program for Calculation of Complex Chemical Equilibrium Composition and Applications. NASA RP-1311 / – Washington, DC: National Aeronautics and Space Administration, 1996. – 58 c.
62. **McBride, B.J., Gordon, S.** Computer Program for Calculation of Complex Chemical Equilibrium Composition and Applications Version 2 (CEA2). NASA RP-1311(2) / –Washington, DC: National Aeronautics and Space Administration, 2003. – 184 c.
63. **Lehrstuhl** für Thermodynamik. Software for the industrial formulation IAPWS-IF97. Ruhr-Universität Bochum. Prof. Dr.-Ing. W. Wagner. 2000.
64. **LibTest**. Calculate properties of water and steam in Microsoft Excel for IAPWS IF-97. University of Applied Sciences of Zittau and Goerlitz. Faculty of Mechanical Engineering. Department of Technical Thermodynamics. Prof. Dr.-Ing. habil. H.-J. Kretzschmar, Dr.-Ing. I. Stucker, Dipl.-Ing.(FH) K. Knobloch.

65. **Set** of subroutines and functions to calculate various derivatives of an equation for the normalized real and ideal part of the Helmholtz function  $F$  for water. Prof. Dr.-Ing. W. Wagner. Version 6.9.94.
66. **Software** for the calculation of thermodynamic properties for a great number of substances. Fluidcal. Prof. Dr.-Ing. W. Wagner.
67. **Сычев В.В.** Новое уравнение для показателя адиабаты влажного пара // Теплоэнергетика. – 1961. – №3. – С. 67 – 70.
68. **Комплекс** прикладных и учебных интерактивных программ для вычисления термодинамических свойств рабочих тел и теплоносителей / В.В. Сычев, А.А. Александров, А.В. Матвеев, И.В. Царев, З.А. Ершова // Известия вузов. Энергетика. – 1990, – № 9. – С. 126 – 128.
69. **Термодинамические** свойства индивидуальных веществ. Справочное издание: в 4-х т. / Л.В. Гурвич, И.В. Вейц, В.А. Медведев и др. 3-е изд., перераб. и расширен. Т. 1. Кн. 2. – М.: Наука, 1978. – 328 с.
70. **Cooper J.R.** Representation of the Ideal-Gas Thermodynamic Properties of Water. // Int. J. Thermophys. – 1982. – № 3. – С. 35 – 43.
71. **Friedman A.S., Haar L.** High Speed Machine Computing of Ideal Gas Thermodynamic Functions –I. Isotopic Water Molecules // Journal of Chemical Physics. – 1954. – №22. – С. 2051 – 2058.
72. **Vidler M. Tennyson J.** Accurate partition function and thermodynamic data for water // Journal of Chemical Physics. – 2000. – т. 113. – № 21. – С. 9766 – 9771.
73. **Woolley H.W.** Thermodynamic Properties for H<sub>2</sub>O in the Ideal Gas State. Water and Steam: Their Properties and Current Industrial Application // Proceedings of the 9th International Conference on the Properties of Water and Steam. – New York: Pergamon Press, 1980. – С. 166 – 175.
74. **Woolley H.W.** Ideal Gas Thermodynamic Functions for Water // Journal of Research of the National Bureau of Standards. – 1987. – № 92. – С. 35 – 51.

75. **Woolley H.W.** Thermodynamic Functions for Carbon Dioxide in the Ideal Gas State // Journal of Research of the National Bureau of Standards. – 1954. № 52. – С. 289.
76. **Диоксид углерода жидкий и газообразный.** Плотность, фактор сжимаемости, энтальпия, энтропия, изобарная теплоемкость, скорость звука и коэффициент объемного расширения при температурах 220...1300 К и давлениях 0.1...100 МПа. Таблицы стандартных справочных данных ГСССД 96-86. – М.: Изд-во стандартов, 1986 г. – 28 с.
77. **Термодинамические свойства кислорода:** ГСССД. Серия монографии / В.В. Сычев, А.А. Вассерман, А.Д. Козлов, Г.А. Спиридонов, В.А. Цымарный. – М.: Изд-во стандартов, 1981. – 340 с.
78. **Термодинамические свойства азота /** Сычев В.В., Вассерман А.А., Козлов А.Д. и др. – М.: Изд-во стандартов, 1977. – 352 с.
79. **Термодинамические свойства воздуха /** Сычев В.В., Вассерман А.А., Козлов А.Д., Спиридонов Г.А., Цымарный В.А. – ГСССД. Серия монографии. – М.: Изд-во стандартов, 1978. – 276 с.
80. **Метан жидкий и газообразный, термодинамические свойства, коэффициенты динамической вязкости и теплопроводности при температурах 91 – 700 К и давлениях 0.1...100 МПа.** ГСССД – 195-01 / А.Д. Козлов, Ю.В. Мамонов, М.Д. Сычев, С.И. Рыбаков и др. – М., 2001. – 43 с.
81. **Александров А.А., Орлов К.А., Очков В.Ф.** Исследование схем парогазовых установок с впрыском водяного пара в газовый тракт // Новое в российской электроэнергетике. – 2004. – № 4.
82. **Теоретические основы теплотехники. Теплотехнический эксперимент:** Справочник / Под общ. ред. чл.-корр. РАН А.В. Клименко и проф. В.М. Зорина. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во МЭИ, 2001. – 564 с. – (Теплоэнергетика и теплотехника; Кн. 2).

83. **Воронец Д., Козич Д.** Влажный воздух: термодинамические свойства и применение. Пер. с сербохорв. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 136 с.
84. **Мухачев Г.А.** Термодинамика парогазовых смесей: Учебное пособие/ – Казань: Изд-во КГТУ, 1995. – 67 с.
85. **Тепловые** и атомные электрические станции: Справочник / Под общ. ред. В.А. Григорьева, В.М. Зорина. – 2-е изд., перераб. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 608 с.
86. **Combined-cycle** gas steam turbine power plants / Kehlhofer R.H., Warner J., Nielsen H., Bachmann R. – Tulsa: PennWell publishing company, 1999. – 298 с.