

# НОВЫЙ ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ РАСЧЕТА ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ВОДЫ И ВОДЯНОГО ПАРА

В.С. Рабенко, к. т. н., В.А. Буданов, Е.А. Нуждин, инженеры

Ивановский государственный энергетический университет

**Введение.** В 1997 г. Международной ассоциацией по свойствам воды и водяного пара (МАСВП) (International Association for the Properties of Water and Steam (IAPWS)), членами которой являются все основные промышленные страны, включая Россию, была разработана новая система уравнений для вычисления параметров воды и водяного пара, далее называемой **Формуляцией IF-97** [1]. Данные о теплофизических свойствах воды и водяного пара, вычисляемые по принятым МАСВП уравнениям, являются, по существу, международным промышленным стандартом, который должен применяться во всех видах технических расчетов, включая контрактные. В 1999г. в России выпущены Таблицы теплотехнических свойств воды и водяного пара (в дальнейшем Таблицы) целиком, основывающиеся на уравнениях Формуляции IF-97[1]. Эти Таблицы являются в настоящее время нормативным материалом для различных теплотехнических расчетов.

Развитие компьютерных систем для обеспечения технологических сфер деятельности энергетического производства, в первую очередь поддержки принятия решений, мониторинга состояния оборудования, экспертных и тренажерных систем, потребовало разработки новых математических пакетов на базе минимизации вычислительных процессов, в том числе и для вычисления теплофизических свойств рабочих сред [7].

Существующие программы расчёта теплофизических свойств воды и водяного пара ориентированы прежде всего на проектные работы, для которых время вычислительных процессов не является определяющим фактором [7]. Для имитационного моделирования сложных энергообъектов прежде всего важна скорость расчёта параметров. Например, в компьютерном тренажёре энергоблока 300 МВт для ОАО «Конаковская ГРЭС» за шаг расчёта (0,1 с) всей модели блока происходит около 5000 вызовов функций. В связи с этим, нами разработан новый программный комплекс (RVS-05.1) для быстрых расчетов параметров пара и воды на базе языка программирования Delphi, обладающий высокой скоростью расчёта параметров и достаточной для инженерных расчётов точностью.

**Актуальность выполнения данного программного продукта.** Система уравнений формуляции IF-97 описывает свойства воды и водяного пара с высокой точностью, но она весьма сложна, состоит из уравнений, содержащих полиномы высокой степени и требует для расчетов большого объема памяти и значительного времени.

Попытки составления уравнений, удобных для массовых теплотехнических расчетов, предпринимались неоднократно [2÷4,6]. Основной задачей явилось составление на основе этих уравнений программного комплекса для расчета термодинамических функций воды и водяного пара [6].

**Реализация метода и алгоритм его построения.** В основу разработки нового вычислительного комплекса было положено следующее: а) создание табличных баз опорных данных; б) интерполяция табличных данных; в) минимизация вычислений, проводимых ПЭВМ в процессе обработки баз данных. За обработку баз данных отвечают подпрограммы-обработчики. Они преобразуют поступившие данные к необходимому виду и осуществляют обращение к необходимым базам данных, а также связь между базами. После получения опорных параметров проводится их интерполяция для получения необходимой точности возвращаемых данных. В отличие от предшествующих версий из основного алгоритма вычисления полностью исключены уравнения для вычислений теплофизических свойств воды и пара. Это привело к увеличению точности вычислений и уменьшению времени запуска программы. Структурно алгоритм работы простейшего обработчика изображен на рис.1.



Рис. 1. Алгоритм работы простейшего обработчика

**Перечень функций реализованных в комплексе.** Ниже приводится список функций, реализованных в комплексе.

Таблица 1. Список возвращаемых функций RVS-05.

Наименование функции	Функция
<b>Функции линии насыщения</b>	
давление насыщения- $p_s$ от температуры насыщения- $t_s$	$p_s = f(t_s)$
удельный объем воды- $v'$ от температуры насыщения- $t_s$	$v' = f(t_s)$
удельный объем пара- $v''$ от температуры насыщения- $t_s$	$v'' = f(t_s)$

Продолжение табл. 1.

<b>Наименование функции</b>	<b>Функция</b>
удельная энтальпия воды - $h'$ от температуры насыщения - $t_s$	$h' = f(t_s)$
удельная энтальпия пара - $h''$ от температуры насыщения - $t_s$	$h'' = f(t_s)$
удельная теплота парообразования - $r$ от температуры насыщения - $t_s$	$r = f(t_s)$
удельная энтропия воды - $s'$ от температуры насыщения - $t_s$	$s' = f(t_s)$
удельная энтропия пара - $s''$ от температуры насыщения - $t_s$	$s'' = f(t_s)$
разница энтропии пара и воды - $s'' - s'$ от температуры насыщения - $t_s$	$s'' - s' = f(t_s)$
истинная изобарная теплоемкость - $c_p$ от температуры насыщения - $t_s$	$c_p = f(t_s)$
теплопроводность - $\lambda$ от температуры насыщения - $t_s$	$\lambda = f(t_s)$
динамическая вязкость - $\mu$ от температуры насыщения - $t_s$	$\mu = f(t_s)$
число Прандтля - $Pr$ от температуры насыщения - $t_s$	$Pr = f(t_s)$
температура насыщения - $t_s$ от давления насыщения - $p_s$	$t_s = f(p_s)$
удельного объема воды - $v'$ от давления насыщения - $p_s$	$v' = f(p_s)$
удельного объема пара - $v''$ от давления насыщения - $p_s$	$v'' = f(p_s)$
удельная энтальпия воды - $h'$ от давления насыщения - $p_s$	$h' = f(p_s)$
удельная энтальпия пара - $h''$ от давления насыщения - $p_s$	$h'' = f(p_s)$
удельная теплота парообразования - $r$ от давления насыщения - $p_s$	$r = f(p_s)$
удельная энтропия воды - $s'$ от давления насыщения - $p_s$	$s' = f(p_s)$
удельная энтропия пара - $s''$ от давления насыщения - $p_s$	$s'' = f(p_s)$
разница энтропии пара и воды - $s'' - s'$ от давления насыщения - $p_s$	$s'' - s' = f(p_s)$
истинная изобарная теплоемкость - $c_p$ от давления насыщения - $p_s$	$c_p = f(p_s)$
теплопроводность - $\lambda$ от давления насыщения - $p_s$	$\lambda = f(p_s)$
динамическая вязкость - $\mu$ от давления насыщения - $p_s$	$\mu = f(p_s)$
число Прандтля - $Pr$ от давления насыщения - $p_s$	$Pr = f(p_s)$
<b>Определение области расположения входных параметров (определение x)</b>	
x по давлению - $p$ и температуре - $t$	$x = f(p, t)$
x по давлению - $p$ и энтропии - $s$	$x = f(p, s)$
x по давлению - $p$ и энтальпии - $h$	$x = f(p, h)$
<b>Функции однофазной области</b>	
удельный объем среды - $v$ от давления - $p$ и температуры - $t$	$v = f(p, t)$
удельная энтальпия среды - $h$ от давления - $p$ и температуры - $t$	$h = f(p, t)$
удельная энтропия среды - $s$ от давления - $p$ и температуры - $t$	$s = f(p, t)$
истинная изобарная теплоемкости - $c_p$ от давления - $p$ и температуры - $t$	$c_p = f(p, t)$

Продолжение табл. 1.

<b>Наименование функции</b>	<b>Функция</b>
скорость звука- <b>w</b> от давления- <b>p</b> и температуры- <b>t</b>	$w = f(p, t)$
теплопроводность - $\lambda$ от давления- <b>p</b> и температуры- <b>t</b>	$\lambda = f(p, t)$
динамическая вязкость - $\mu$ от давления- <b>p</b> и температуры- <b>t</b>	$\mu = f(p, t)$
число Прандтля- <b>Pr</b> от давления- <b>p</b> и температуры- <b>t</b>	$Pr = f(p, t)$
температура- <b>t</b> от давления - <b>p</b> и энтальпии - <b>h</b>	$t = f(p, h)$
удельный объем среды- <b>v</b> от давления - <b>p</b> и энтальпии - <b>h</b>	$v = f(p, h)$
удельная энтропия среды- <b>s</b> от давления - <b>p</b> и энтальпии - <b>h</b>	$s = f(p, h)$
истинная изобарная теплоемкость- <b>c<sub>p</sub></b> от давления - <b>p</b> и энтальпии - <b>h</b>	$c_p = f(p, h)$
скорость звука- <b>w</b> от давления - <b>p</b> и энтальпии - <b>h</b>	$w = f(p, h)$
теплопроводность - $\lambda$ от давления - <b>p</b> и энтальпии- <b>h</b>	$\lambda = f(p, h)$
динамическая вязкость - $\mu$ от давления - <b>p</b> и энтальпии - <b>h</b>	$\mu = f(p, h)$
число Прандтля- <b>Pr</b> от давления - <b>p</b> и энтальпии - <b>h</b>	$Pr = f(p, h)$
температура- <b>t</b> от давления - <b>p</b> и энтропии - <b>s</b>	$t = f(p, s)$
удельный объем среды- <b>v</b> от давления - <b>p</b> и энтропии - <b>s</b>	$v = f(p, s)$
удельная энтальпия среды- <b>h</b> от давления - <b>p</b> и энтропии - <b>s</b>	$h = f(p, s)$
истинная изобарная теплоемкость- <b>c<sub>p</sub></b> от давления - <b>p</b> и энтропии - <b>s</b>	$c_p = f(p, s)$
скорость звука- <b>w</b> от давления - <b>p</b> и энтропии - <b>s</b>	$w = f(p, s)$
теплопроводность - $\lambda$ от давления - <b>p</b> и энтропии - <b>s</b>	$\lambda = f(p, s)$
динамическая вязкость - $\mu$ от давления - <b>p</b> и энтропии - <b>s</b>	$\mu = f(p, s)$
число Прандтля- <b>Pr</b> от давления - <b>p</b> и энтропии - <b>s</b>	$Pr = f(p, s)$
температура- <b>t</b> от энтальпии - <b>h</b> и энтропии - <b>s</b>	$t = f(h, s)$
давление- <b>p</b> от энтальпии - <b>h</b> и энтропии - <b>s</b>	$p = f(h, s)$
удельный объем среды- <b>v</b> от энтальпии - <b>h</b> и энтропии - <b>s</b>	$v = f(h, s)$
истинная изобарная теплоемкость- <b>c<sub>p</sub></b> от энтальпии - <b>h</b> и энтропии - <b>s</b>	$c_p = f(h, s)$
скорость звука- <b>w</b> от энтальпии - <b>h</b> и энтропии - <b>s</b>	$w = f(h, s)$
теплопроводность - $\lambda$ от энтальпии - <b>h</b> и энтропии - <b>s</b>	$\lambda = f(h, s)$
динамическая вязкость - $\mu$ от энтальпии - <b>h</b> и энтропии - <b>s</b>	$\mu = f(h, s)$
число Прандтля- <b>Pr</b> от энтальпии - <b>h</b> и энтропии - <b>s</b>	$Pr = f(h, s)$
<b>Функции двухфазной области:</b>	
удельный объем воды- <b>v</b> от давления - <b>p</b> и степени сухости - <b>x</b>	$v = f(p, x)$
удельная энтальпия воды- <b>h</b> от давления - <b>p</b> и степени сухости - <b>x</b>	$h = f(p, x)$
удельная теплота парообразования- <b>r</b> от давления - <b>p</b> и степени сухости - <b>x</b>	$r = f(p, x)$
удельная энтропия воды- <b>s</b> от давления - <b>p</b> и степени сухости - <b>x</b>	$s = f(p, x)$
истинная изобарная теплоемкость- <b>c<sub>p</sub></b> от давления - <b>p</b> и степени сухости - <b>x</b>	$c_p = f(p, x)$
теплопроводность - $\lambda$ от давления - <b>p</b> и степени сухости - <b>x</b>	$\lambda = f(p, x)$

Окончание табл. 1.

Наименование функции	Функция
динамическая вязкость $\mu$ от давления $p$ и степени сухости $x$	$\mu = f(p, x)$
число Прандтля $Pr$ от давления $p$ и степени сухости $x$	$Pr = f(p, x)$
удельный объем воды $v$ от температуры $t$ и степени сухости $x$	$v = f(p, x)$
удельная энтальпия воды $h$ от температуры $t$ и степени сухости $x$	$h = f(p, x)$
удельная энтропия воды $s$ от температуры $t$ и степени сухости $x$	$s = f(p, x)$
удельная теплота парообразования $r$ от температуры $t$ и степени сухости $x$	$r = f(p, x)$
истинная изобарная теплоемкость $c_p$ от температуры $t$ и степени сухости $x$	$c_p = f(p, x)$
теплопроводность $\lambda$ от температуры $t$ и степени сухости $x$	$\lambda = f(p, x)$
динамическая вязкость $\mu$ от температуры $t$ и степени сухости $x$	$\mu = f(t, x)$
число Прандтля $Pr$ от температуры $t$ и степени сухости $x$	$Pr = f(t, x)$

**Структура построения комплекса.** В целом комплекс представляет собой базы табличных данных и подпрограммы-обработчики, отвечающие за обработку и связь между собой, между базами данных и внутри них. Укрупненная структура комплекса представлена на рис. 2.

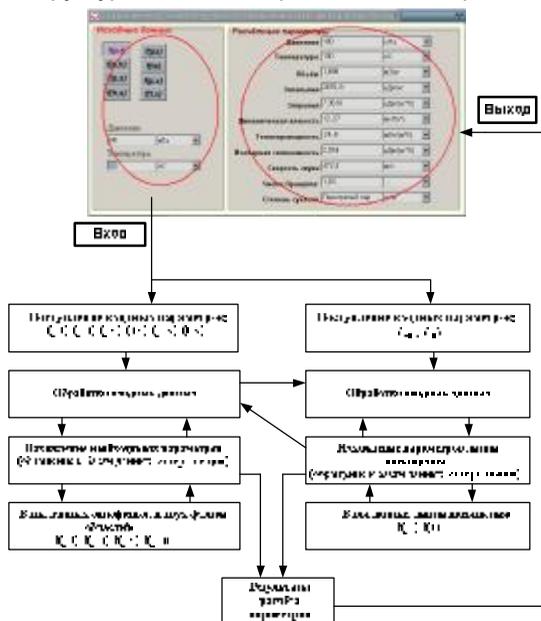


Рис. 2. Структура комплекса по вычислению теплофизических свойств воды и водяного пара

**Оценка точности вычислений.** Идея метода оценки заключается в том, чтобы сгенерировать несколько точек в окрестности опорной и по ним вычислить опорную точку. Проводя данную операцию в различных областях можно оценить точность метода вычислений. Тестирование функций проводилось во всем диапазоне работы программного продукта (рис 3.), при этом особое внимание уделялось области линии насыщения. Проводились также сравнения WSP (Версия 6, авторы : Орлов К.А., Александров А.А., Очков А.В., Очков В.Ф.) [5, 8] и RVS-05.1 по точности и скорости вычислений. Некоторые результаты этого сравнения представлены в таблицах 1 и 2.

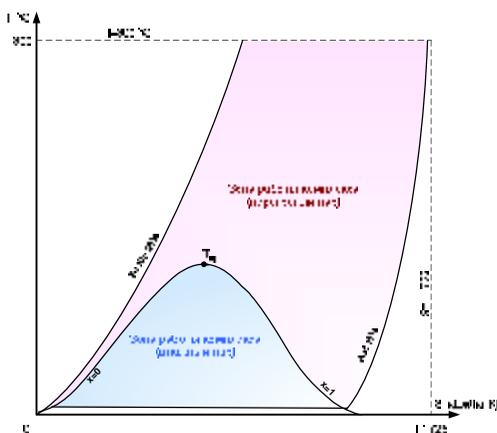


Рис. 3. Область вычисляемых параметров RVS-05.1

### Выводы

1. В сравнении с другими аналогичными продуктами RVS-05.1 обладает следующими достоинствами:

- высокая скорость расчёта параметров;
- достаточная точность для инженерных расчётов (максимальная погрешность менее 1 %);
- обширный список реализованных функций воды и водяного пара;
- легкое подключение функций в другие приложения, созданные на базе языка программирования Delphi;
- наличие удобной программы для тестирования комплекса;
- наличие калькулятора функций воды и водяного пара;

2. Программный продукт может использоваться в различных расчетах для определения теплофизических свойств воды и водяного пара, где необходима большая скорость расчёта.

3. На данный момент ведутся работы, которые обеспечат возможность подключения комплекса к приложениям на базе других языков программирования.

Таблица 1. Сравнение программных продуктов по точности вычислений

№ п/п	Тестируемый расчётный параметр	Входные параметры			Расхождение вычисленных значений WSP и RVS-05.1, %
		Постоянный параметр	Диапазон изменения переменного параметра	Шаг переменного параметра	
1	<b>температура насыщения</b> (от $t_s = f(p_s)$ )	-	<b>Давление</b> 0 - 22 МПа	10 кПа	0
2	<b>давление насыщения</b> ( $p_s = f(t_s)$ )	-	<b>Температура</b> 1 - 373 °С	1 °С	0
3	<b>температура</b> ( $t = f(p, h)$ )	<b>Энтальпия,</b> кДж/кг 100 500 1000 1200 1500 1800 2000 2200 2400 2800 3000 3200 3500 3800 4200	<b>Давление</b> 1 Па - 100 МПа	10 кПа	0 0,9 0,5 0,5 0,5 0,5 0,5 0,5 0 0 0 0 0 0 0
4	<b>удельная изобарная теплоёмкость</b> ( $c_p = f(p, t)$ )	<b>Температура,</b> °С 20 50 70 100 150 200 250 300 350 370 373 380 400 500 800	<b>Давление</b> 1 Па - 100 МПа	0,1 кПа	0 0 0 0 0 0,1 0,1 0,1 0,6 0,1 0,1 0,1 0,1 0,1 0

Таблица 2. Сравнение WSP и RVS-05.1 по скорости вычислений

№ № п/ п	Рассчитываемый параметр	Входной параметр			Машинное время расчёта*		Соотношение $T_1/T_2$
		Постоянный параметр (Давление, МПа)	Диапазон переменно-гопараметра	Шаг переменного параметра	по WSP $T_1$ , мс	по RVS-05.1 $T_2$ , мс	
11	<b>температура насыщения</b> (от $t_s = f(p_s)$ )	-	<b>Давление</b> 1 Па - 22 МПа	1 Па	3094	761	4,1
22	<b>давление насыщения</b> ( $p_s = f(t_s)$ )	-	<b>Температура</b> 0-373 °С	0,01 °С	180	120	1,5
33	<b>удельный объём</b> ( $v = f(p, t)$ )	1 2 3 10 20 21 22 31 40 50 60 70 100	<b>Температура</b> 0-800 °С	0,01 °С	220 241 240 240 231 240 240 260 270 280 290 310 341	220 220 221 230 230 231 200 80 80 80 91 80 80	1 1,1 1,1 1,1 1,1 1,0 1,2 3,3 3,4 3,5 3,2 3,9 4,3
44	<b>удельная изобарная теплоёмкость</b> ( $c_p = f(p, t)$ )	1 5 11 15 20 21 22 23 24 31 35 50 60 70 100	<b>Температура</b> 0-800 °С	0,01 °С	300 310 300 300 301 301 310 300 321 341 350 381 401 421 461	241 231 230 240 230 230 201 150 140 80 70 90 90 80 90	1,3 1,3 1,3 1,3 1,3 1,3 1,5 2 2,3 4,2 5 4,2 4,5 5,3 5,1

\*Примечание: Тестирование проводилось на машине Intel Pentium III / 812МГц

## Библиографический список

1. **Александров А. А.** Таблицы теплофизических свойств воды и водяного пара. Справочник. Рек. Гос. службой стандартных справочных данных. ГСССД Р-776-98./ А. А. Александров, Б.А. Григорьев; М.: Издательство МЭИ, 1999. – 168 с.: ил.
2. **Александров А. А.** Система уравнений IAPWS-IF97 для вычисления термодинамических свойств воды и водяного пара в промышленных расчетах. 2. Дополнительные уравнения / А.А. Александров // Теплоэнергетика.- 1998.- № 10.- С. 64 – 72.
3. **Мошкарин А. В.** Анализ перспектив развития отечественной теплоэнергетики. / А.В. Мошкарин, М.А. Девочкин, Б.Л. Шельгин, В.С. Рабенко / под ред. А.В. Мошкарин.-Иван. Гос.Энерг. ун-т.–Иваново,2002.– 255 с.: ил.
4. **Ривкин С.Л.** Уравнения состояния воды и водяного пара для машинных расчётов процессов и оборудования электростанций / Л.С. Ривкин, Е.А. Кременевская, // Теплоэнергетика.- 1986.-№4.-С. 48 - 50.
5. **Свидетельство** РФ№2000610803 об официальной регистрации программы для ЭВМ " WaterSteamPro / К.А. Орлов, А.А. Александров, А.В. Очков, В. Ф. Очков // Регистр. 25.08.2001-М.: Роспатент.
6. **Свидетельство** РФ№2002611742 об официальной регистрации программы для ЭВМ. Комплекс программ для расчета термодинамических свойств воды и водяного пара / В.С. Рабенко, В.С. Каекин, В.Н. Трухачев // Регистр. 10.10.2002-М.: Роспатент.
7. **Рабенко В. С.** Пакет программ для расчёта термодинамических функций воды и водяного пара: тез. докл. межд. науч.-техн. конф. «Состояние и перспективы развития электротехнологии» / В.С. Рабенко, В.Н. Трухачев, А.Л. Виноградов.-Иваново.-1999.
8. WSP[Электронный ресурс]. Сайт <http://wsp.ru>.