

И. О. ДРЕЙЕР, В. А. РАВИНА
Рижский технический университет.

АППРОКСИМАЦИЯ ДЛЯ РАСЧЕТА ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ВОДЫ И ВОДЯНОГО ПАРА

Создание систем автоматизации проектирования выдвигает необходимость разработки методов расчета физико-химических свойств веществ в зависимости от внешних условий (температура, давление, концентрация и т. д.).

Одной из возможностей является использование обобщенных аппроксимационных полиномов. Такой метод представления данных предпочтителен при расчете свойств базовых веществ (например, воды), для которых доступны точные и обширные экспериментальные результаты и свойства которых желательно рассчитать достаточно точно.

Свойства воды и водяного пара подробно табулированы в [1]; приведены также аппроксимирующие зависимости для расчета указанных таблиц. Однако эти зависимости отличаются сложностью и содержат много констант. Учитывая, что в практике проектирования типового химико-технологического оборудования область изменения температуры и давления значительно меньше и не требуется высокая точность аппроксимации, появляется возможность использования более простых зависимостей.

Известно также большое количество других аппроксимаций [2], отличающихся точностью и диапазоном изменения аргументов. Нами использован обобщающий полином, предложенный Стоа [3], и позднее использованный Гонзалесом—Позо [4]:

$$y = \sum_{i=1}^5 a_i x^{i-2} + a_6 \sqrt{x} + a_7 \ln x, \quad (1)$$

где y — рассчитываемое свойство,
 x — аргумент (температура или давление),
 a_i — коэффициенты.

В качестве исходных данных использованы Международная скелетная таблица 1963 г. для термодинамических свойств воды и водяного пара на линии насыщения (давление, плот-

Уравнения линии насыщения $t(p)$ и $p(t)$, теплота испарения $r(t)$ и $r(p)$,
поверхностное натяжение $\sigma(t)$ и $\sigma(p)$ воды

Параметры	$t(p)$ °C	$p(t)$ бар	$r(t)$ кДж/кг	$r(p)$ кДж/кг	$\sigma(t)$ мН/м	$\sigma(p)$ мН/м
a_1	$2,408 \cdot 10^{-2}$	90,1512	2096,65	-0,18	24,3697	$-9,9 \cdot 10^{-3}$
a_2	68,7155	-24,3298	1858,4	2323,92	70,76	63,35
a_3	-4,45402	1,25898	10,1447	2,599	0,7881	-1,192
a_4	0,15108	$-3,35312 \cdot 10^{-3}$	$-1,2908 \cdot 10^{-2}$	-0,454	$2,6 \cdot 10^{-3}$	0,1292
a_5	$-4,243 \cdot 10^{-3}$	$8,6317 \cdot 10^{-6}$	$-7,75 \cdot 10^{-6}$	$2,16 \cdot 10^{-2}$	$4,153 \cdot 10^{-6}$	$-5,59817 \cdot 10^{-3}$
a_6	35,1295 14,6573	-22,9455 32,2251	-304,626 552,47	-68,87 -39,96	-15,278 18,194	-3,208 -2,781
Δy	$1 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-2}$	0,5	0,5	0,1	0,1

$$f(x) = \sum_{i=1}^5 a_i x^{i-2} + a_6 \sqrt{x} + a_7 \ln x$$

Аргумент: температура ($^{\circ}\text{C}$).
 Изобарная теплоемкость C_p , коэффициент теплопроводности λ , динамическая вязкость μ , плотность ρ , энтальпия i и число Прандтля Pr для воды и водяного пара на линии насыщения как функции температуры

Параметры	$C_p(t)$ кДж/(кг $\cdot^{\circ}\text{C}$)	$\lambda(t)$ Вт/(м $\cdot^{\circ}\text{C}$)	$\xi(t)$ мПа $\cdot\text{с}$ (сП)	$\rho(t)$ кг/м 3	$i(t)$ кДж/кг	$Pr(t)$
ВОДА						
a_1	-0,62157	-1,87439	-1,749081	3157,7	-2685,6	-20,5718
a_2	4,428	1,1121	2,8381	73,6	805,5	23,708
a_3	$-5,6165 \cdot 10^{-3}$	$-1,71434 \cdot 10^{-2}$	$3,454576 \cdot 10^{-2}$	28,4958	-14,6846	0,220872
a_4	$7,569 \cdot 10^{-6}$	$2,8153 \cdot 10^{-5}$	$-6,10751 \cdot 10^{-5}$	$-5,4664 \cdot 10^{-2}$	$2,6937 \cdot 10^{-2}$	$-4,2335 \cdot 10^{-4}$
a_5	$3,232 \cdot 10^{-8}$	$-4,666 \cdot 10^{-8}$	$7,43696 \cdot 10^{-6}$	$7,247 \cdot 10^{-5}$	$-2,502 \cdot 10^{-5}$	$5,302 \cdot 10^{-7}$
a_6	0,13137	0,38245	-0,55857	-593,67	426,51	-3,0254
a_7	-0,23145	-0,59906	$2,7328 \cdot 10^{-2}$	958,92	-738,11	-2,1502
Δy	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-4}$	0,5	0,5	$1 \cdot 10^{-2}$
ВОДЯНОЙ ПАР						
a_1	$-1,3 \cdot 10^{-5}$	$-1,3232 \cdot 10^{-2}$	$-1,12759 \cdot 10^{-2}$	40,93439	-786,64	2,0361
a_2	1,84399	$2,2 \cdot 10^{-2}$	$1,1833 \cdot 10^{-2}$	-11,1003	2722,7	0,254
a_3	$2,70094 \cdot 10^{-2}$	$-2,084 \cdot 10^{-5}$	$7,676 \cdot 10^{-5}$	0,559436	-6,064	$1,2005 \cdot 10^{-2}$
a_4	$-1,169945 \cdot 10^{-4}$	$4,83 \cdot 10^{-8}$	$-2,2032 \cdot 10^{-7}$	$-1,472055 \cdot 10^{-3}$	$1,6421 \cdot 10^{-2}$	$-1,87 \cdot 10^{-5}$
a_5	$4,321368 \cdot 10^{-6}$	$9,49 \cdot 10^{-10}$	$4,189 \cdot 10^{-10}$	$3,88855 \cdot 10^{-6}$	$-3,55 \cdot 10^{-5}$	$4,2 \cdot 10^{-8}$
a_6	0,161424	$2,217 \cdot 10^{-3}$	$1,267 \cdot 10^{-4}$	-10,05379	155,18	-0,2526
a_7	$-1,5236 \cdot 10^{-3}$	$-4,032 \cdot 10^{-3}$	$-1,478 \cdot 10^{-3}$	14,48729	-241,79	0,4745
Δy	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-3}$	1	$1 \cdot 10^{-2}$

Аргумент: давление (бар)
 Изобарная теплоемкость C_p , коэффициент теплопроводности λ , динамическая вязкость μ , плотность ρ , энтальпия i и число Прандтля Pr для воды и водяного пара на линии насыщения как функции давления

Параметры	$C_p(p)$ кДж/кг	$\lambda(p)$ Вт/(м·°С)	$\mu(p)$ мПа·с (сП)	$\rho(p)$ кг/м ³	$i(p)$ кДж/кг	$Pr(p)$
В О Д А						
a_1	$3,5 \cdot 10^{-4}$	$7,6 \cdot 10^{-5}$	$4,33 \cdot 10^{-3}$	-0,14	0,202	$3,699 \cdot 10^{-2}$
a_2	4,1764	0,7312	-0,2282	972,1	306,3	-2,057
a_3	$2,306 \cdot 10^{-2}$	$1,053 \cdot 10^{-2}$	-0,17647	-8,87	-14,04	-1,318
a_4	$-9,08 \cdot 10^{-4}$	$-5,775 \cdot 10^{-4}$	$9,09 \cdot 10^{-3}$	0,415	0,787	$6,791 \cdot 10^{-2}$
a_5	$3,15 \cdot 10^{-5}$	$1,72 \cdot 10^{-5}$	$-3,149 \cdot 10^{-4}$	$-6,7 \cdot 10^{-3}$	$-3,28 \cdot 10^{-2}$	$-2,351 \cdot 10^{-3}$
a_6	$1,651 \cdot 10^{-2}$	$-6,185 \cdot 10^{-2}$	0,67187	-3,27	125,47	5,012
a_7	$3,26 \cdot 10^{-3}$	$3,286 \cdot 10^{-2}$	0,25077	-8,93	66,8	-1,7756
Δy	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-8}$	$1 \cdot 10^{-3}$	0,5	0,5	$1 \cdot 10^{-2}$
В О Д Я Н О Й П А Р						
a_1	$-1,3 \cdot 10^{-5}$	$4,7 \cdot 10^{-6}$	$1,3 \cdot 10^{-6}$	$-1,05 \cdot 10^{-4}$	$2,6 \cdot 10^{-2}$	$1,12 \cdot 10^{-4}$
a_2	1,84399	$2,201 \cdot 10^{-2}$	$1,0613 \cdot 10^{-2}$	$-6,19 \cdot 10^{-2}$	2630,0	0,98
a_3	$2,7009 \cdot 10^{-2}$	$2,715 \cdot 10^{-4}$	$5,316 \cdot 10^{-4}$	0,48383	-11,65	$1,72 \cdot 10^{-2}$
a_4	$1,1699 \cdot 10^{-4}$	$-1,995 \cdot 10^{-5}$	$3,703 \cdot 10^{-5}$	$-2,483 \cdot 10^{-3}$	0,4026	$-6,38 \cdot 10^{-4}$
a_5	$4,32 \cdot 10^{-6}$	$1,09 \cdot 10^{-6}$	$1,536 \cdot 10^{-6}$	$1,084 \cdot 10^{-4}$	$-1,54 \cdot 10^{-2}$	$1,42 \cdot 10^{-5}$
a_6	0,161424	$2,504 \cdot 10^{-3}$	$1,9415 \cdot 10^{-3}$	0,17003	56,01	$-7,86 \cdot 10^{-3}$
a_7	$-1,52 \cdot 10^{-3}$	$1,017 \cdot 10^{-3}$	$5,618 \cdot 10^{-4}$	$-1,247 \cdot 10^{-2}$	27,08	$2,71 \cdot 10^{-2}$
Δy	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-3}$	1	$1 \cdot 10^{-2}$

ность, энтальпия) и таблица коэффициента поверхностного натяжения воды, изобарной теплоемкости, коэффициентов теплопроводности и динамической вязкости, числа Прандтля воды и водяного пара в состоянии насыщения [1] в пределах от 10 до 180 °С (шаг 10 °С). Указанный диапазон соответствует изменению давления от 0,012 до 10 бар.

Для расчета коэффициентов аппроксимации a_i использовалась стандартная программа LREG [5] с не принципиальными изменениями в части ввода данных и вывода результатов расчета.

Полученные a_i округлялись с учетом ошибки Δy (в качестве которой выбиралась наибольшая величина, или допуск исходных табличных данных, или точность аппроксимирующего полинома, т. е. среднеквадратическая ошибка σ) по формуле

$$\Delta a_i = \frac{\Delta y}{n \left| \frac{\partial y}{\partial a_i} \right|}, \quad (2)$$

где $n=7$ — количество коэффициентов.

Коэффициенты a_i приведены в таблицах 1—3.

Следует обратить внимание на то, что некоторые физико-химические свойства воды практически не зависят от давления в силу небольшого коэффициента сжимаемости. Поэтому температурные зависимости, полученные на основе данных в состоянии насыщения, можно распространять также на другой диапазон давления, например атмосферное давление.

Полученные уравнения используются нами для учебных целей — создания информационных подсистем расчета теплообменной аппаратуры.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Вукалович М. П., Ривкин С. Л., Александров А. А. Таблицы теплофизических свойств воды и водяного пара. — М.: Изд-во стандартов, 1969. — 408 с.
2. Александров А. А. Уравнения для термодинамических свойств воды и водяного пара: Обзоры по теплофизическим свойствам веществ. — М., 1978. — № 3. — 91 с.
3. Stoa T. A. Formulas estimate data for dry saturated steam // Chem. Eng. (USA). — 1984. — Vol. 91. N 25. — P. 97.
4. Gonzalez-Pozo V. Formulas estimata properties for dry, saturated steam // Chem. Eng. (USA). — 1986. — Vol. 93, N 9. — P. 123.
5. Эберт К., Эдерер Х. Компьютеры: Применение в химии. М.: Мир, 1988. — 415 с.