

Е. С. Селезнев, П. Ю. Худяков, А. А. Кутаев
Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург
seleznev-ekb@mail.ru

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА РАСЧЕТА ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ
ПАРАМЕТРОВ В ОКОЛОКРИТИЧЕСКОЙ ОБЛАСТИ НА ОСНОВЕ
ФОРМУЛЯЦИИ IAPWS-IF97 В СОБСТВЕННОЙ ПРОГРАММЕ
WATER-STEAM CALCULATOR

В работе рассмотрен процесс разработки алгоритма расчета термодинамических параметров в околокритической области формуляции IAPWS-IF97 для повышения возможностей собственной программы Water-Steam Calculator. Изучены основные уравнения, описывающие данную область диаграммы. Найдены решения для идентификации околокритической области в библиотеке Water-Steam Calculator.

Ключевые слова: *IAPWS-IF97; Water-Steam Calculator; термодинамические параметры; околокритическая область; тепловая схема.*

E. S. Seleznev, P. Yu. Khudyakov, A. A. Kutaev
Ural Federal University, Yekaterinburg

DEVELOPMENT OF THE ALGORITHM FOR CALCULATING
THERMODYNAMIC PARAMETERS IN THE NEAR-CRITICAL
AREA ON THE BASIS OF IAPWS-IF97 FORMULATION IN OWN
PROGRAM WATER-STEAM CALCULATOR

The paper describes the process of developing an algorithm for calculating thermodynamic parameters in the near-critical region of the IAPWS-IF97 formulation in order to enhance the capabilities of the Water-Steam Calculator. The basic equations describing this area of the diagram are studied. Found solutions to identify the near-critical region in the library of the Water-Steam Calculator.

Key words: *IAPWS-IF97; Water-Steam Calculator; thermodynamic parameters; near-critical region; heat scheme.*

В настоящее время при моделировании тепловых схем ТЭС необходимо максимально быстро и точно вычислять параметры воды и водяного пара. Для автоматизированного расчета этих параметров была создана собственная программа Water-Steam Calculator (WSC) [1], в основе которой лежит динамически подключаемая библиотека с возможностью ее использования в другом программном обеспечении.

Для повышения возможностей WSC было принято решение о внедрении информации о третьей области диаграммы IAPWS-IF97 [2] (рис. 1) помимо остальных областей, о которых говорилось ранее [3].

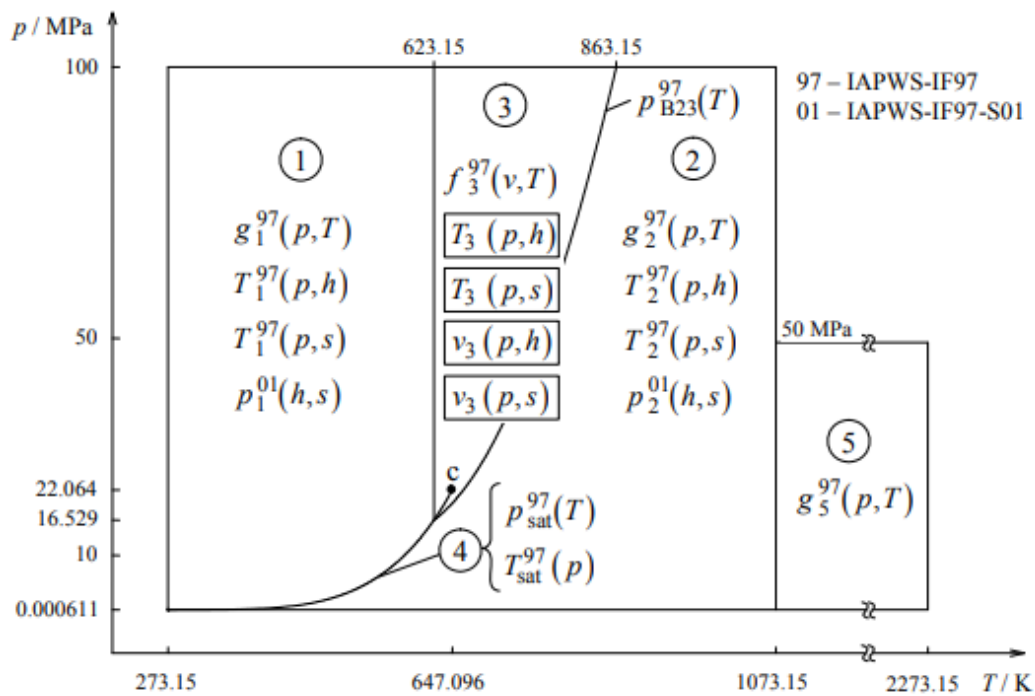


Рис. 1. Области формуляции IAPWS-IF97

В отличие от первой и второй областей, которые описываются уравнением энергии Гиббса в зависимости от давления p и температуры T , третья (околокритическая) область описывается уравнением Гельмгольца, которое в свою очередь зависит от температуры T и плотности ρ :

$$\frac{f(\rho, T)}{RT} = \phi(\delta, \tau) = n_1 \ln \delta + \sum_{i=2}^{40} n_i \delta^{i_1} \tau^{j_i}$$

Околокритическая область делится на две подобласти $3a$ и $3b$. Граница между ними описывается критической изоэнтропической линией $s = s_c = 4,41202148223476$ кДж/(кг·К), на которой лежит критическая точка.

Требуемое условие для идентификации околокритической области в координатах по давлению p и температуре T – температура выше 623,15 К; давление выше давления, описываемого линией $p_{B23}(T)$. На настоящий момент в WSC можно вычислить параметры в третьей области по давлению и температуре такие, как энтальпия и энтропия.

Сложность идентификации этой области диаграммы по координатам давления и энтальпии (p, h) или давления и энтропии (p, s) заключается в том, что границы между следующими областями: 1-й, 2-й, 3-й и 4-й – сложны. Это представлено на рис. 2 и рис. 3 соответственно.

С одной стороны, на границе 1-й и 3-й областей можно найти энтальпию от заданного давления и границей температуры $T = 623,15$ К. На границе 2-й и 3-й областей также можно определить энтальпию при помощи заданного давления и обратной функции – $T_{B23}(p)$. Заданное давление должно находиться в пределах $16,5292 \leq p \leq 100$.

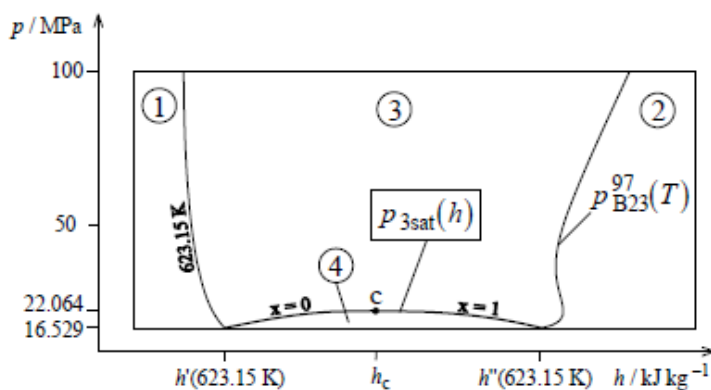


Рис. 2. Границы околокритической области в координатах p и h

Идентификация границ 3-й области в координатах p и s аналогична предыдущему случаю, за исключением того, что вместо энтальпии находится энтропия от заданных условий [4].

Дополнительно используются граничные уравнения $p_{3sat}(h)$ и $p_{3sat}(s)$, которые позволяют определить нахождение точки в двухфазной области (4) или в однофазной области (3).

На основе этих рассмотренных вычисляемых данных можно успешно программно определять околокритическую область.

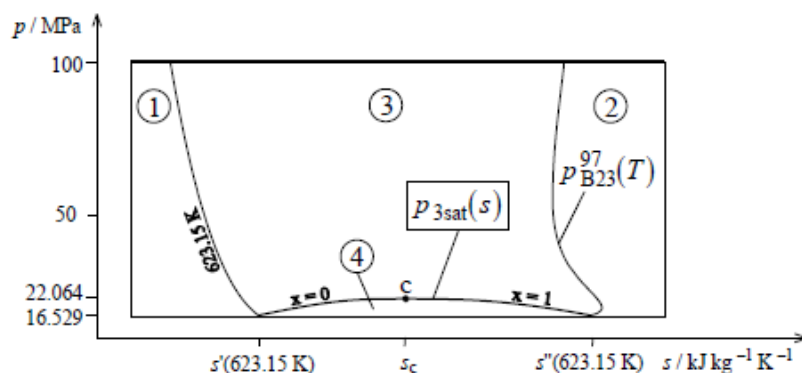


Рис. 3. Границы околокритической области в координатах p и s

Таким образом, были найдены решения для идентификации третьей области в программе WSC и внедрены связанные с этим функции по нахождению термодинамических параметров: давления, температуры, энтальпии и энтропии. Максимальные относительные погрешности (p, T): по энтальпии – 0,02 %, по энтропии – 0,01 %.

Список использованных источников

1. Water-Steam Calculator : свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ / П. Ю. Худяков, А. Ю. Кисельников, Е. С. Селезнев. № 2018613649; дата регистрации 21.03.2018.
2. Revised Release on the IAPWS Industrial Formulation 1997 // The International Association for the Properties of Water and Steam. URL: <http://www.iapws.org/relguide/IF97-Rev.pdf> (дата обращения: 03.09.2018).
3. Селезнев Е. С., Худяков П. Ю. Разработка алгоритма расчета свойств воды и водяного пара по системе уравнений IAPWS-IF97 для моделирования тепловых схем ТЭС // Энерго- и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии : материалы Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, посвященной памяти профессора Данилова Н. И. (1945–2015) – Даниловских чтений (Екатеринбург, 11–15 декабря 2017 г.). Екатеринбург : УрФУ, 2017. С. 352–355.
4. Revised Supplementary Release on Backward Equations for the Functions $T(p, h)$, $v(p, h)$ and $T(p, s)$, $v(p, s)$ for Region 3 of the IAPWS Industrial Formulation 1997 for the Thermodynamic Properties of Water and Steam // The International Association for the Properties of Water and Steam. URL: <http://www.iapws.org/relguide/Supp-Tv%28ph%2Cps%293-2014.pdf> (дата обращения: 04.09.2018).