

УДК 533.1

А.В. ТроценкоОдесская государственная академия холода, ул. Дворянская, 1/3, 65026, г. Одесса, Украина
e-mail: trocenko@paco.net

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КРИТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЧИСТОГО ВЕЩЕСТВА ИЗ ЕДИНОГО УРАВНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ

Предложен метод расчёта критических параметров чистого вещества, соответствующих произвольной модели единого уравнения состояния. В его основе лежит способ достижения критического состояния вдоль точек перегибов зависимости давления от объёма при фиксированных температурах. Рассмотрены особенности и основные этапы расчётов с помощью созданного алгоритма. Представлены и обсуждены результаты вычислений критических параметров для полиномиальной формы единого уравнения состояния.

Ключевые слова: Единое уравнение состояния. Критическая точка. Критические условия. Алгоритм.

A.V. Trotsenko

DETERMINATION OF PURE SUBSTANCE CRITICAL PARAMETERS FROM UNITED EQUATION OF STATE

The computational method for calculations of pure substances critical parameters from united equation of state is suggested. It is based on approach of critical state through inflection points of pressure as function of volume at fixed temperature. The features and main steps of calculation with help of algorithm considered. Results of critical parameters calculations from polynomial equation of state are discussed.

Keywords: United equation of state. Critical point. Critical conditions. Algorithm.

1. ВВЕДЕНИЕ

Единое уравнение состояния (ЕУС) является самодостаточной математической моделью для определения критических параметров описываемого им вещества. Под ними понимаются, в первую очередь, значения давления, температуры и объёма в критической точке. Место, занимаемое данной точкой на термодинамической поверхности состояния, и особенности равновесных свойств вещества в ней делают актуальной задачу вычисления этих параметров.

Можно выделить несколько основных причин важности решения этой задачи. Во-первых, критические параметры однозначно идентифицируют вещество. Во-вторых, с их помощью устанавливается агрегатное состояние вещества. Кроме того, сравнение расчётных и экспериментальных значений критических параметров позволяет судить о качестве используемого ЕУС.

При создании современных моделей ЕУС включение в минимизируемый функционал слагаемых, учитывающих опытные значения критических параметров и удовлетворение критическим условиям в них, является фактически обязательным [1]. Особенно это

касается уравнений состояния, разработанных специально для околокритической области [2]. Поскольку слагаемые, отражающие особенности термодинамических функций в критическом состоянии, составляют лишь часть накладываемых на ЕУС условий, то практически всегда существует отличие принятых (опорных) критических параметров от расчётных. Использование вместо расчётных значений критических параметров их опорных величин может привести к термодинамической несогласованности результатов.

Вычисление этих параметров индивидуальных веществ, несмотря на известную постановку задачи, остаётся сложной проблемой. Её решение обычно производится на основании критических условий как чисто математической задачи, т.е. без учёта термодинамических особенностей рассматриваемой точки. В частности, созданный алгоритм [3], использующий обобщённый метод Ньютона, предполагает вычисление целого ряда производных до четвёртого порядка включительно, в том числе и смешанных производных. Это делает целесообразным для аналитически заданных ЕУС определять производные по формулам численного дифференцирования. Такой подход упрощает подготовительный этап решения задачи, но требует создания дополнительных программных проце-

дур. Кроме того, применение производных высокого порядка, рассчитываемых из аналитических зависимостей или численными методами, может привести к вычислительным трудностям из-за возможного волнообразного характера их изменения.

В работе [4] предложен алгоритм расчёта критических параметров чистых веществ для многоконстантных единых уравнений состояния, основанный на нахождении точки максимума спинодали. Он предполагает использование первого критического условия и процедуры поиска максимума функции одной переменной.

Целью данной работы является разработка и реализация обобщенного алгоритма вычисления критических параметров, использующего лишь производные, входящие в критические условия. Под обобщённым понимается алгоритм, не зависящий ни от формы ЕУС, ни от выбора значений начальных приближений.

2. АЛГОРИТМ РАСЧЁТА КРИТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

Для ЕУС в виде $p=p(T,v)$ критические параметры являются решением следующей системы уравнений третьего порядка:

$$p_c - p(T_c, v_c) = 0; \quad (1)$$

$$\partial p(T_c, v_c) / \partial v = 0; \quad (2)$$

$$\partial^2 p(T_c, v_c) / \partial v^2 = 0, \quad (3)$$

где p , T , v — соответственно, давление, температура и объём. Индекс c означает значение термодинамической функции в критической точке.

Из-за структуры этой системы нахождение искоемых параметров обычно осуществляется определением значений T_c , v_c из критических условий (2), (3) с последующим расчётом давления p_c из (1). Это фактически приводит к понижению порядка системы до второго, но также сопровождается существенными трудностями при вычислении T_c и v_c .

Предлагаемый в данной работе алгоритм использует то обстоятельство, что линия, определяемая уравнением

$$\partial^2 p(T, v) / \partial v^2 = 0, \quad (4)$$

лежит при температуре ниже критической в области нестабильных состояний, проходит через критическую точку и имеет продолжение в однофазной области термодинамической поверхности. Эта кривая является геометрическим местом точек перегиба изотерм в координатах «объём-давление». Она не имеет специального названия, поэтому для краткости в дальнейшем будет именоваться кривой (линией) перегибов.

Как следует из равенства (4), температура и объём на кривой перегибов являются взаимозависимыми

величинами, причём вид конкретной зависимости определяется выбранной формой ЕУС. Для уравнения состояния Ван-дер-Ваальса в приведённых координатах имеется аналитическое решение уравнения (4) относительно τ :

$$\tau = \frac{(3\varphi - 1)^3}{8\varphi^4}, \quad (5)$$

где $\tau = T/T_c$; $\varphi = v/v_c$ — значения приведённых температуры и объёма, соответственно.

Для температур $T \leq T_c$ точка на линии перегибов может быть однозначно определена значением объёма. В то же время для многоконстантных форм ЕУС, где изотерма в области двухфазных состояний имеет вид, отличный от обычного ван-дер-ваальсовского, задание температуры может определять несколько точек перегиба. Это также следует из решения уравнения (5) относительно φ . Данное уравнение должно иметь по крайней мере два действительных значения объёма при заданной температуре. Как показывает анализ уравнения (5), только один из его корней имеет физический смысл. Иллюстрацией вышесказанного служит рис. 1, на котором изображены несколько изотерм, рассчитанных на основе полиномиального ЕУС. На этом рисунке через $\pi = p/p_c$ обозначено приведённое давление как функция φ и τ .

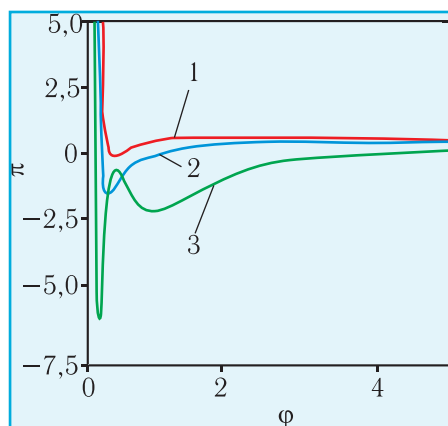


Рис. 1. Изотермы азота в области двухфазных состояний в координатах π - φ при значениях τ : 1 — 0,9; 2 — 0,8; 3 — 0,55

Как видно из рис. 1, при $\tau = 0,55$ изотерма имеет два минимума и, следовательно, две точки перегиба. Однако, как следует из данного рисунка и других наших вычислительных экспериментов, при $1 \geq \tau \geq 0,8$ можно принять, что приведённый объём на линии перегибов является однозначной функцией τ . Этот вывод важен для выбора начального приближения рассматриваемого алгоритма.

Критическое условие (2) можно рассматривать как отдельную точку кривых, задаваемых уравнением

$$\partial p(T, v) / \partial v = 0. \quad (6)$$

В двухфазной области последнее уравнение определяет спинопаль. Значение производной $\partial p(T, v) / \partial v$ вдоль линии перегибов меняется единым образом для всех форм ЕУС и всех веществ. Характер её изменения для уравнения состояния Ван-дер-Ваальса в приведённых координатах изображён на рис. 2.

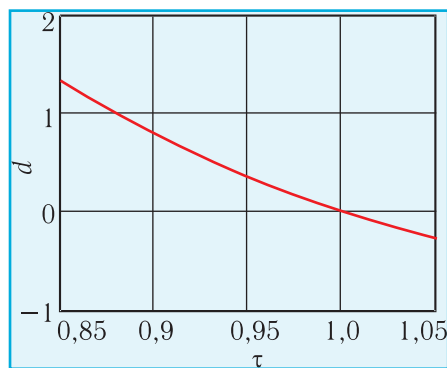


Рис. 2. Изменение производной $d = \partial \pi(\phi, \tau) / \partial \phi$ вдоль линии перегибов

Так как при $\tau < 1$ линия перегибов находится в области нестабильных состояний, то при выполнении данного неравенства имеет место $\partial p(T, v) / \partial v > 0$. При $\tau = 1$ справедливо критическое условие (2), т.е. $\partial p(T, v) / \partial v = 0$. Условие $\tau > 1$ определяет положение линии перегибов в однофазной области, которой соответствует критерий стабильности состояния $\partial p(T, v) / \partial v < 0$. Следовательно, рассматриваемая производная принимает вдоль линии перегибов единственное нулевое значение в критической точке. Это обстоятельство используется в рассматриваемом ниже алгоритме, блок-схема которого приведена на рис. 3.

Блок «Исходные данные» предполагает задание конкретного ЕУС, вещества и аналитических выражений для расчёта производных $\partial p(T, v) / \partial v$ и $\partial^2 p(T, v) / \partial v^2$ по выбранному уравнению состояния. В принципе до-

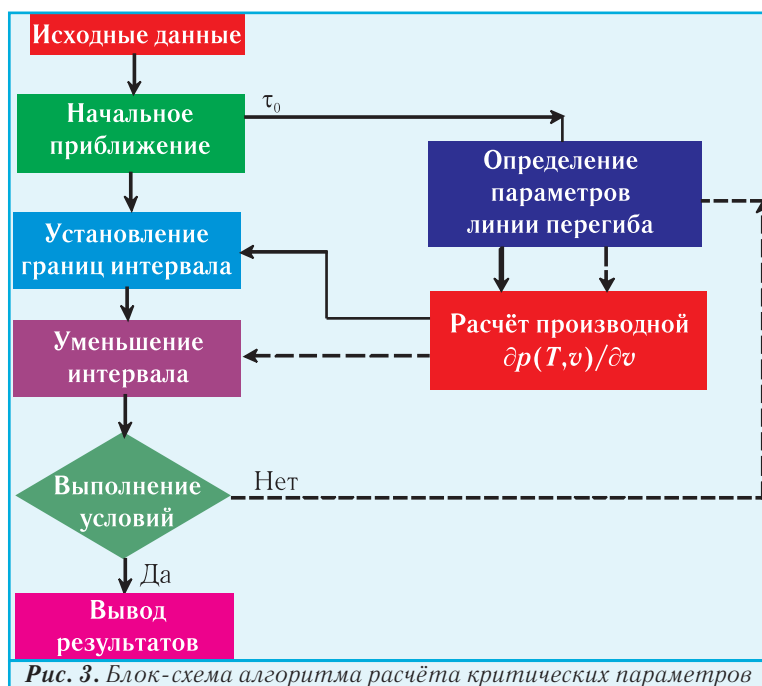


Рис. 3. Блок-схема алгоритма расчёта критических параметров

пустимо использование для расчёта производных численных методов вместо указанных выражений. Но это приводит к усложнению алгоритма дополнительными процедурами, тем более что для известных ЕУС определить аналитически эти производные не составляет проблемы.

В блоке «Начальное приближение» формируется исходное данное для реализации этапа «Установление границ интервала». Как отмечено ранее, в качестве такого данного может использоваться температура T_0 либо объём v_0 . Более естественным является выбор температуры T_0 , так как разработаны надёжные методы прогнозирования T_c [2,5,6] и имеются экспериментальные данные по критической температуре для многих веществ. Однако характер зависимости $v(T)$ на кривой перегибов требует осторожности при таком выборе. На рис. 4 изображена эта зависимость для уравнения состояния Ван-дер-Ваальса, для общности рассчитанная в приведённых координатах. Для всех других исследованных форм ЕУС качественно вид функции $v(T)$ не меняется.

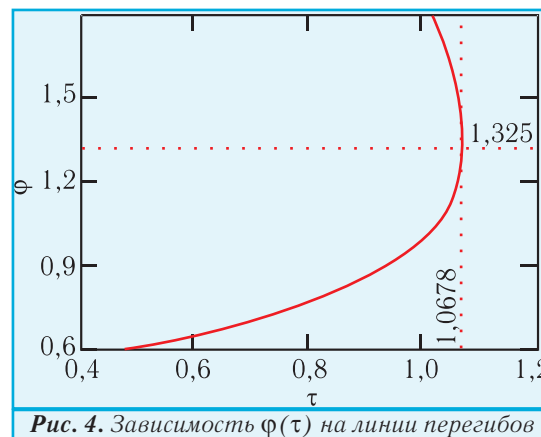


Рис. 4. Зависимость $\phi(\tau)$ на линии перегибов

Из рис. 4 следуют две особенности функции $\phi(\tau)$ на линии перегибов. Первая заключается в том, что для этой линии существует максимум $\tau(\phi)$, координаты которого для рассматриваемого ЕУС приведены непосредственно на рис. 4. Как видно, положение этого максимума по температуре довольно близко к значению T_c . Для полиномиальной формы ЕУС, например, наблюдается ещё меньшее различие между температурами в критической точке и в точке максимума. Таким образом, при выборе значения T_0 , большего температуры точки максимума, возможно возникновение существенных трудностей с реализацией алгоритма из-за отсутствия точки кривой перегибов, соответствующему ему. Как показали конкретные тесты алгоритма, значения приведённой температуры τ_0^b целесообразно выбирать из диапазона:

$$0,8 \leq \tau_0^b \leq 0,9. \quad (7)$$

Это позволяет избежать указанных выше трудностей и гарантирует сходимость процесса вычислений. Верхний индекс в τ_0^b означает, что температура T_0 отнесена к опорному значению T_c .

Вторая особенность функции $\varphi(\tau)$ на линии перегибов состоит в её неоднозначности, т.е. одному значению соответствуют два значения φ . Это обстоятельство может стать существенным при выборе τ_0^b в районе точки максимума $\tau(\varphi)$. Если τ_0^b определяется из диапазона, ограниченного неравенствами (7), то эта особенность может не приниматься во внимание. Этот вывод иллюстрируется данными, приведёнными на рисунках 5 и 6. Кривые на этих рисунках построены на основании расчётов, выполненных для азота с использованием полиномиального ЕУС, записанного в виде:

$$z = 1 + \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n b_{ij} \varphi^{-(i+1)} \tau^{-j}, \quad (8)$$

где z — коэффициент сжимаемости. Пределы суммирования m, n и коэффициенты b_{ij} взяты из [7]. На рисунках 5, 6 через $sd(\varphi, \tau)$ обозначена функция, вычисляющая производную $\partial^2 \pi(\varphi, \tau) / \partial \varphi^2$.

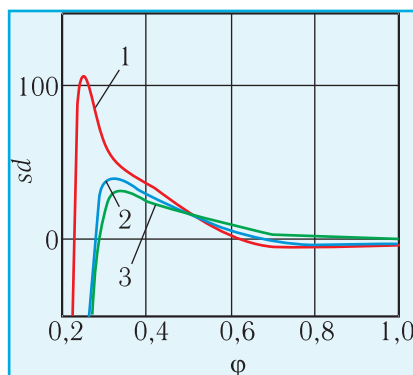


Рис. 5. Вторая производная от давления по объёму на изотермах в приведённых координатах $sd-\varphi$ при значениях τ : 1 — 0,8; 2 — 0,9; 3 — 1

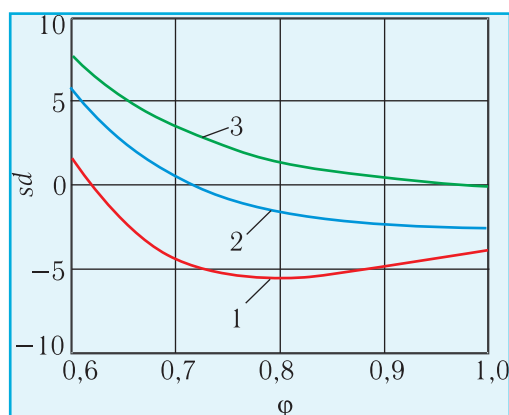


Рис. 6. Положение «истинных» корней уравнения кривой перегибов при значениях τ : 1 — 0,8; 2 — 0,9; 3 — 1

Как видно из рис. 5, корни уравнения

$$\partial^2 \pi(\varphi, \tau) / \partial \varphi^2 = 0 \quad (9)$$

существенно отличаются на отрезке, заданном неравенствами (7), т.е. имеется возможность достаточно большой вариации объёма φ при выборе его в качестве начального приближения. На рис. 6 представлен увеличенный фрагмент графика 5, показывающий «истинные» корни уравнения (9).

Таким образом, с целью удобства желательно выбирать нулевым приближением температуру, а для исключения указанных выше особенностей функции $\varphi(\tau)$ — объём. Компромисс между этими вариантами найден в выборе τ_0^b , удовлетворяющем условию (7), с последующим расчётом $\varphi_0 = \varphi(\tau_0^b)$ из полученного аппроксимационного выражения для зависимости (5). Использование уравнения состояния Ван-дер-Ваальса для выбора φ_0 обеспечивает устойчивую работу рассматриваемого алгоритма и приводит к его упрощению за счёт отказа от процедуры поиска начальной точки кривой перегибов при заданной температуре.

Этапы алгоритма «Установление границ интервала» и «Уменьшение интервала» реализуют поиск решения уравнений (4), (6) прямым методом. Для нахождения их корней используются соответственно подпрограммы условно названные «Определение параметров линии перегиба» и «Расчёт производной $\partial p(T, v) / \partial v$ ».

В подпрограмме «Определение параметров линии перегиба» первоначально из аппроксимационного выражения находится начальное приближение для объёма при заданной температуре. Далее расчётом с выбранным приращением по объёму устанавливается направление изменения производной $\partial^2 p(T, v) / \partial v^2$ с последующим пошаговым её вычислением до тех пор, пока значения этой производной на границах интервала не будут иметь разные знаки. Локализация корня заключается в стягивании найденного интервала $\Delta\varphi$ до заданной величины. В созданном алгоритме для этого использовался метод деления интервала пополам. Уменьшение интервала производилось до $|\Delta\varphi| \leq 10^{-4}$ при решении уравнения $\partial^2 \pi(\varphi, \tau) / \partial \varphi^2 = 0$. Данная подпрограмма возвращает значение объёма, соответствующего точке линии перегиба при заданной температуре. В ней используется подпрограмма-функция, рассчитывающая производную $\partial^2 p(T, v) / \partial v^2$ для выбранного ЕУС.

Подпрограмма «Расчёт производной $\partial p(T, v) / \partial v$ » выполняет вычисление указанной производной при известных значениях температуры и объёма из аналитической зависимости, найденной для применяемого ЕУС.

На этапе «Установление границ интервала» определяются значения температур на линии перегибов, при которых производная $\partial p(T, v) / \partial v$ имеет различные знаки. Это осуществляется пошаговым приращением температуры в известном направлении, задаваемом условием (7). В конкретных расчётах шаг по приведённой температуре равнялся 0,02. Выбор столь малого приращения обусловлен рассмотренными ранее

особенностями линии перегибов. На каждом шаге по подпрограмме «Определение параметров линии перегиба» вычислялся объём при известной температуре с последующим применением подпрограммы «Расчёт производной $\partial p(T, v)/\partial v$ ».

На этапе «Уменьшение интервала» производилось его стягивание до длины, удовлетворяющей требованиям, указанным в логическом блоке «Выполнение условий». Процедура стягивания реализовывалась методом деления интервала пополам. Вычисления на каждом шаге данного и предыдущего этапов идентичны. Условием окончания этого этапа в реализованной программе являлось $|\Delta\tau| \leq 10^{-4}$, где $\Delta\tau$ — длина интервала по приведённой температуре.

В представленном алгоритме логический блок «Выполнение условий» содержит ограничения на величины $\Delta\phi$ и $\Delta\tau$, т.е. фактически на погрешность расчёта объёма и температуры в критической точке. В принципе возможны иные или дополнительные требования к окончанию вычислений, в частности, к точности выполнения критических условий. Однако этот вопрос требует дополнительных исследований, и отдельные данные к нему представлены в следующем разделе настоящей работы.

3. РЕАЛИЗАЦИЯ АЛГОРИТМА РАСЧЁТА КРИТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

Вычислительные эксперименты с разработанным алгоритмом проводились для полиномиальной формы ЕУС (8). Его тестирование, результаты которого представлены в таблицах 1 и 2, выполнялось для различных криогенных веществ. Параметры данного уравнения состояния для азота взяты из [7], для кислорода — из [8], для аргона и метана — из [1]. С целью обобщения данные в этих таблицах отображены в приведённой форме.

Табл. 1 характеризует качество определения критических параметров в опорной критической точке. Под ней понимается совокупность базовых критических параметров, использованных при создании данного ЕУС и при расчёте термодинамических функций. Их численные значения приведены в указанных выше литературных источниках. Для данной точки значение коэффициента сжимаемости может быть

Таблица 1. Критические параметры в опорной точке

Вещество	π^b	z_c^b	z_c	$\partial\pi/\partial\phi$	$\partial^2\pi/\partial\phi^2$
азот	0,9989	0,2899	0,2896	$2,72 \cdot 10^{-2}$	$-8,32 \cdot 10^{-2}$
кислород	0,9973	0,2878	0,2871	$5,30 \cdot 10^{-2}$	$-1,13 \cdot 10^{-1}$
аргон	1,0000	0,2912	0,2912	$1,82 \cdot 10^{-5}$	$-7,88 \cdot 10^{-5}$
метан	0,9995	0,2862	0,2860	0,0503	$-1,53 \cdot 10^{-1}$

Таблица 2. Критические параметры в расчётной точке

Вещество	π	ϕ	τ	z_c	$\partial\pi/\partial\phi$	$\partial^2\pi/\partial\phi^2$
азот	1,021	0,9995	1,003	0,2945	$4,63 \cdot 10^{-4}$	$-3,71 \cdot 10^{-3}$
кислород	1,041	1,0090	1,007	0,2997	$-5,74 \cdot 10^{-4}$	$1,56 \cdot 10^{-5}$
аргон	1,000	1,0000	1,000	0,2914	$-6,08 \cdot 10^{-4}$	$5,45 \cdot 10^{-5}$
метан	1,038	1,0010	1,006	0,2954	$-4,07 \cdot 10^{-4}$	$6,60 \cdot 10^{-5}$

определено двояким образом. Во-первых, это значение может быть вычислено из уравнения состояния как

$$z_c = z(\phi = 1, \tau = 1).$$

В этом случае приведённое давление

$$\pi(\phi, \tau) = \frac{\tau z(\phi, \tau)}{\phi z_c} \quad (10)$$

в критической точке равно единице. Кроме того, величина коэффициента сжимаемости, обозначенная ниже z_c^b , может быть вычислена непосредственно из принятых опорных критических параметров:

$$z_c^b = \frac{p_c v_c}{RT_c}.$$

В общем случае значения z_c и z_c^b отличаются, что следует и из табл. 1. Поэтому подстановка в равенство (10) вместо z_c величины z_c^b приводит к отличному от единицы приведённому давлению, обозначенному в табл. 1 как π^b . Две последние колонки табл. 1 иллюстрируют выполнение критических условий в опорной точке при использовании величины z_c .

Расчётная критическая точка характеризуется параметрами (табл. 2), вычисленными исходя из рассмотренного алгоритма. Значения приведённых термодинамических функций в табл. 2 отнесены к соответствующим опорным критическим параметрам.

Как видно из данных этой таблицы, все расчётные критические параметры π , ϕ , τ , за исключением случая аргона, отличаются от опорных значений. Причём отклонения опорных значений от расчётных обычно превышают погрешность эксперимента. В частности, погрешность для коэффициента сжимаемости в рассмотренных примерах достигает 3 %. Эти факты ещё раз подчеркивают необходимость использования расчётных значений критических параметров для обеспечения термодинамической согласованности результатов.

Необходимо отметить, что принятые при реализации алгоритма значения погрешностей $\Delta\phi$ и $\Delta\tau$, по-видимому, являются достаточными для достижения необходимой точности вычисления параметров критической точки. При этом порядки погрешностей вычисления приведённых критических условий, а также $\Delta\phi$ и $\Delta\tau$ практически совпадают.

Представленный алгоритм тестировался при варьировании в широком диапазоне начальных приближений, и во всех случаях наблюдалась сходимость результатов.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный алгоритм, который использует свойства линии перегибов, является одним из возможных, учитывающих специфику термодинамической поверхности в околоскритической области. Крити-

ческая точка, являясь уникальным математическим объектом, обладает целым рядом особенностей. Их учёт позволяет создать более простые и надёжные алгоритмы расчёта критических параметров по сравнению с чисто математическим подходом.

В то же время, хотя программа определения расчётных значений параметров в критической точке и должна входить в пакет для создания и анализа ЕУС, она по своей сути может рассматриваться как изолированная. То есть она не должна непосредственно участвовать в расчёте термодинамических свойств и процессов. Представленные в данной работе результаты получены в математической среде MathCAD.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Вассерман А.А.** Методы аналитического описания и расчета теплофизических свойств газов и жидкостей с помощью ЭЦВМ и применение их для технически важных веществ// Автореф. дисс. ... докт. техн. наук. — М.: ИВТ, 1980. — 48 с.

2. **Анисимов М.А., Рабинович В.А., Сычев В.В.** Термодинамика критического состояния индивидуальных веществ. — М.: Энергоатомиздат, 1990. — 190 с.

3. Обобщенный алгоритм определения критических параметров чистых веществ на основании единых уравнений состояния// **Г.К. Лавренченко, А.В. Троценко, Э.И. Табачник и др.**// В кн. «Пути автоматизации электробытовых машин и приборов». — К.: Техника, — 1982. — С. 17-19.

4. **Троценко А.В., Валякина А.В.** Определение критических параметров чистых веществ из единых уравнений состояния// Технические газы. — 2005. — № 4. — С. 50 - 55.

5. **Рид Р., Праусниц Дж., Шервуд Т.** Свойства газов и жидкостей. — Л.: Химия. Ленингр. отд., 1982. — 592 с

6. **Мищенко С.В., Черепенников И.А., Кузьмин С.Н.** Расчёт теплофизических свойств веществ. — Воронеж: Изд-во ВГУ, 1991. — 208 с.

7. Термодинамические свойства азота/ **В.В. Сычев, А.А. Вассерман, А.Д. Козлов и др.** — М.: Изд-во стандартов, 1977. — 352 с.

8. Термодинамические свойства кислорода/ **В.В. Сычев, А.А. Вассерман, А.Д. Козлов и др.** — М.: Изд-во стандартов, 1981. — 326 с.

MVK www.MVK.ru (495) 995-05-95

**НАСОСЫ
КОМПРЕССОРЫ
АРМАТУРА**

FKM UFI Approved Event

ВЕДУЩИЙ ОТРАСЛЕВОЙ ФОРУМ СТРАНЫ

ТЕПЕРЬ В КРОКУСЕ
Международный форум
PCVEXPO
[WWW.PCVEXPO.RU](http://www.pcvexpo.ru)

21 — 24 ОКТЯБРЯ 2008
РОССИЯ, МОСКВА, МВЦ «КРОКУС ЭКСПО»
WWW.MVK-CROCUS.RU

БОЛЕЕ 25 СТРАН МИРА
БОЛЕЕ 18 ТЫСЯЧ ПОСЕТИТЕЛЕЙ
БОЛЕЕ 500 УЧАСТНИКОВ
БОЛЕЕ 30 ТЫСЯЧ КВ. М ПЛОЩАДИ

ФОРУМ ПРОВОДИТСЯ ПРИ ПОДДЕРЖКЕ:
Союза производителей нефтегазового оборудования
Правительства Москвы
Московской торгово-промышленной палаты
Европейского комитета по вопросам арматуростроения (CEIR)
Европейской ассоциации производителей насосов (EUROPUMP)
Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору

Специализированные выставки:
«НАСОСЫ»
**«КОМПРЕССОРНАЯ ТЕХНИКА,
ПНЕВМАТИКА,
ПНЕВМОИНСТРУМЕНТ»**
«АРМАТУРА»
«ПРИВОДЫ И ДВИГАТЕЛИ»

TEL./ФАКС: (495) 925-34-82; E-MAIL: PCVEXPO@MVK.RU

Организаторы Форума:
ЗАО «МВК»
Российская ассоциация производителей насосов
Ассоциация компрессорщиков и пневматиков
Научно-промышленная ассоциация арматуростроителей

Генеральные информационные спонсоры:
МОСЭНЕРГО
СИБЭНЕРГО
Генеральный информационный партнер:
ОБОРУДОВАНИЕ

Региональные представительства ЗАО «МВК»:
МВК-СЕРБИЯ-САРАЈЕВО: +7 (812) 532-15-24,
МВК-ИРИТ: +7 (043) 271-24-76,
МВК-РОУТА: +7 (843) 291-75-88,
МВК-ОБЛАСТЬ: +7 (383) 226-52-17,
МВК-ЮГ: +7 (863) 234-52-45

на фото: Ильямов