

УДК 532.528

В. С. БАГДАСАРЯН, А. А. ГАРИН

ОБ ОДНОМ МЕТОДЕ АНАЛИТИЧЕСКОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ СТАТИЧЕСКОГО ОБЪЕМА ПАРОГАЗОВЫХ КАВИТАЦИОННЫХ ПУЗЫРЬКОВ

С учетом влияния поверхностного натяжения составляются уравнения баланса давления между внешней средой и внутренней массой кавитационного пузырька. По уравнению Ван-дер-Ваальса определяются значение поверхностного натяжения и зависимость от заданной температуры, а также величина внешнего давления. Затем во введённом полуэмпирическому уравнению состояния газообразного вещества, которое с погрешностью до 5% описывает состояние реальных газов во всем диапазоне изменения температуры, определяется давление внутри кавитационного пузырька. По найденным значениям внешнего давления, поверхностного натяжения и внутреннего давления кавитационного пузырька определяется его объем или радиус, исходя из уравнения баланса давления.

Предлагаемый метод по сравнению с существующими обладает высокой степенью точности и может быть использован для практических целей взамен экспериментальных методов, которые связаны с большими техническими трудностями.

Табл. 1. Библиогр. 4 назв.

Հանր առնելով մակերևութային շարժան ազդեցությունը, կազմվում է կավիտացիոն պղպղակի արտաքին միջավայրի և ներքին զանգվածի միջև ճնշման բալանսի նախասարման Հան-Վան-Պեր-Վալթի նախասարման որոշվում է մակերևութային շարժան արժեքը՝ կախված որված ջերմաստիճանից և ինչպես նաև արտաքին ճնշման մեծությունը: Բազայինը նյութերի վիճակի ճնշման կիրառության նախասարման իման վրա որը մինչև 5% սխալով նկարագրում է իրական գազերի վիճակը յերմաստիճանի փոփոխման ընթացքում: որոշվում է նշումը կավիտացիոն պղպղակի ներքին ճնշման, կավիտացիոն պղպղակի ներքին ճնշման, մակերևութային շարժան և արտաքին ճնշման նախված սրժեղների իման վրա որոշվում է նրա մասվաը կամ շառավիղը՝ պնելով ճնշման բալանսի նախասարմանը:

Առաջարկվող մեթոդը, նամեմատած գոյություն ունեցողների հետ ունի բարձր աստիճանի ճշտություն և կարող է ոգտագործվել գործնական նպատակներով փորձարարական մեթոդների փոխարեն, որոնք կապված են տիրանիկական մեծ դժվարությունների հետ:

В настоящее время на практике в большинстве случаев объем парогазовых кавитационных пузырьков рассчитывают, основываясь на уравнение идеального газа и равновесие давлений между внешней средой и внутренней массой в пузырьке, т. е. на уравнение баланса давлений, имеющего вид [1]

$$p_{\text{вн}} + 2\sigma/r = p_{\text{св}} = p_{\text{пар}} + p_{\text{газ}}, \quad (1)$$

где $p_{\text{вн}}$ — внешнее давление среды, окружающее пузырек, σ — коэффициент поверхностного натяжения, r — радиус кавитационного пузырька, $p_{\text{св}}$ — суммарное давление внутри пузырька, $p_{\text{пар}}$ — давление насыщенного пара данной жидкости, $p_{\text{газ}}$ — общее давление растворенных газов в пузырьке.

Однако определение $p_{см}$ на основе уравнения состояния идеального газа, когда максимальный объем кавитационного пузырька не превышает порядка 10^{-20} м³, а давление доходит до нескольких тысяч μ Па, приводит к значительным погрешностям, доходящим до 300%.

В статье предлагается новый подход к аналитическому определению объема парогазового кавитационного пузырька, основанный на видоизмененном полуэмпирическом уравнении состояния газообразных веществ [2]. При этом делаются следующие допущения: масса вещества в кавитационном пузырьке остается постоянной; отсутствует мгновенный теплообмен между средой и массой в пузырьке; кавитационные пузырьки имеют форму шара; приведенное суммарное число молей $\Pi_{пр}$ всех компонентов в пузырьке линейно зависит от его объема V и выражается соотношением $\Pi_{пр} = 0,041643 V$; кажущаяся температура кипения смеси в пузырьке является аддитивной функцией температуры кипения присутствующих компонентов.

Сущность и порядок реализации метода заключается в следующем. Радиус парагазового пузырька выражается через его объем и по уравнению (1) определяется его значение

$$V = \left(\frac{3,224 \sigma}{p_{см} - p_{нп}} \right)^3, \quad (2)$$

где σ выражено в н.м, а $p_{см}$ и $p_{нп}$ — н.м².

Определяется коэффициент поверхностного натяжения как функция температуры жидкости, для чего рекомендуется уравнение Ван-дер-Ваальса [3] в виде

$$\sigma = k_0 T_{кр}^{1/3} p_{кр}^{2/3} (1 - T/T_{кр})^{\Pi_2}, \quad (3)$$

где k_0 и Π_2 — эмпирические константы, $T_{кр}$ и $p_{кр}$ — критические температура и давление данной жидкости, T — текущая температура.

Для воды уравнение (3) представляется в виде рабочей формулы

$$\sigma_w = 0,115 (1 - T/647,3)^{0,777}. \quad (4)$$

Внешнее давление $p_{нп}$ рассчитывается, основываясь на уравнение зависимости давления насыщенных паров от его температуры [4]

$$\ln p_2/p_1 = -\frac{L_{исп}}{R} (1/T_{нп} - 1/T), \quad (5)$$

где p_1 , p_2 — давление паров жидкости при температурах плавления $T_{нп}$ и T ; $L_{исп}$ — теплота испарения; R — универсальная газовая постоянная.

Для воды уравнение (5) имеет вид

$$p_w = 963,333 \exp[1,741 (3,663 - 1000/T)] \quad (6)$$

Для определения суммарного давления внутри кавитационного пузырька $p_{см}$ рекомендуется видоизмененное полуэмпирическое уравнение состояния газообразных веществ, представленное в форме

$$[22,4(1 - T/T_{кр})^3 + 3,4 V_{кр}^* - M_{пр} d_{пр}] \left(p_{см} f_{пр} + \frac{74,796 M_{пр} T_{пр}}{d_{пр}} \right) = \\ = Rt \left[\left(\frac{5,1 T_{кнк}}{4T + 3,4 T_{кнк}} \right)^2 \left(\frac{3 M_{пр} p_{см}}{M_{пр} p_{см} + 5560 d_{пр} T_{кнк} \omega_{пр}} \right) - \left(\frac{5,1 T_{кнк}}{4T + 3,4 T_{кнк}} \right) \times \right. \\ \left. \times \left(\frac{3 M_{пр} p_{см}}{M_{пр} p_{см} + 5560 d_{пр} T_{кнк} \omega_{пр}} \right) + 1 \right], \quad (7)$$

где 22,4 — мольный объем идеального газа, $m^3/кмоль$, $M_{пр}$ — приведенная молекулярная масса, $кг$, $d_{пр}$ — приведенная плотность массы в пузырьке, $кг/м^3$, $V_{кр}^*$ — приведенный критический объем парогазовой смеси в пузырьке, $m^3/кмоль$, $\omega_{пр}$ — приведенный фактор асимметрии молекул в парогазовой смеси в кавитационном пузырьке, $T_{кнк}$ — кажущаяся температура кипения парогазовой смеси, $К$.

Сначала, исходя из данных химического анализа, определяются массовые доли насыщенного пара $m_{нп}$ и растворенных газов $m_{г1}, m_{г2}, \dots, m_{гk}$, а затем, исходя из массовых долей и известных физических параметров, определяются приведенные и кажущиеся величины. Приведенная молекулярная масса и плотность определяются уравнениями

$$M_{пр} = M_{нп} m_{нп} + M_{г1} m_{г1} + M_{г2} m_{г2} + \dots + M_{гk} m_{гk}, \quad (8)$$

$$d_{пр} = \frac{1}{m_{нп} d_{нп} + m_{г1} d_{г1} + m_{г2} d_{г2} + \dots + m_{гk} d_{гk}}, \quad (9)$$

где $M_{нп}, M_{г1}, M_{г2}, \dots, M_{гk}$ и $d_{нп}, d_{г1}, d_{г2}, \dots, d_{гk}$ — молекулярные массы и плотности насыщенного пара и растворенных газов при $p \rightarrow \infty$ и $T \rightarrow 0$, $кг/м^3$. Эти плотности можно принять равными плотностям компонентов в жидком состоянии.

Кажущаяся температура кипения смеси определяется следующим приближенным уравнением:

$$T_{кнк} \approx T_{кнкн} m_{нп} + T_{кнк1} m_{г1} + \dots + T_{кнкк} m_{гk}, \quad (10)$$

а приведенный фактор асимметрии $\omega_{пр}$ —

$$\omega_{пр} = \omega_{нп} m_{нп} + \omega_{г1} m_{г1} + \dots + \omega_{гk} m_{гk}, \quad (11)$$

где фактор асимметрии каждого компонента определяется зависимостью

$$= \left[\sum_{i=1}^N \left(\frac{N_i}{N} \right)^{\frac{z_i + 2}{z_i}} \left(\frac{18}{10 + \Gamma_i} \right)^{\frac{z_i(N-1)}{(z_i+6)(N+3)}} \right]^{0,25}, \quad (12)$$

здесь C , N_i , N — числа разнородных, одноименных атомов и их общее число в молекуле, z_i — атомный номер данного элемента, Γ_j — номер группы атомов в периодической системе Менделеева.

Для иллюстрации метода предлагается решение четырех примеров применительно к водной среде. Исходные данные приводятся в таблице. В первом варианте масса кавитационного пузырька состоит из 90% H_2O , 5% O_2 и 5% N_2 , во втором варианте только H_2O , третьем — O_2 и четвертом — N_2 .

Таблица

Параметр	Размерность	Значения параметров по вариантам			
		I	II	III	IV
		$H_2O + O_2 + N_2$	H_2O	O_2	N_2
		$m_{r1} = 0,9$			
		$m_{r2} = 0,05$	$m_{r1} = 1$	$m_{r1} = 1$	$m_r = 1$
$T_{кр}$	К	647,3	647,3	647,3	647,3
$V_{кр, ар}$	$м^3$	0,0589	0,056	0,078	0,0921
$M_{ар}$	кг	19,2	18,0	32,0	28,0
$d_{ар}$	мм	947,2	920,3	1331,7	1046,2
$T_{кок}$	К	344,1	371,3	90,2	77,4
$\sigma_{ар}$		0,867571	0,853620	0,994410	0,991850

По уравнениям (4) и (6) определяются коэффициент поверхностного натяжения σ_n и внешнее давление $p_{вн}$ как функции принятых температур. Исходя из уравнения (7), рассчитывает суммарное давление внутри кавитационного пузырька $p_{св}$ для всех четырех вариантов и по уравнению (2) определяются объемы и радиусы кавитационного пузырька.

Величина объема (радиуса) парогазового кавитационного пузырька, полученная расчетным путем по предложенной методике для умеренных температур (от температуры плавления до температуры кипения жидкости), соответствует экспериментальным данным, приведенным в литературе ((0,32—0,12) · 10⁻⁶ м).

ЛИТЕРАТУРА

1. Рождественский В. В. Кавитация. — Л.: Судостроение, 1977. — 247 с.
2. Гарян А. А. Новое полуэмпирическое уравнение состояния газообразных веществ // Изв. АН АрмССР. Сер. физики. — 1980. — Т. XV, вып. 2. — С. 138—145.
3. Рид Р., Шервуд Т. Свойство газов и жидкостей. — Л.: Химия, 1971. — 700 с.
4. Курсы В. А. Краткий курс физической химии. — М.: Химия, 1978. — 620 с.