

ТЕПЛОФИЗИКА

УДК 536.246:621.175

А. А. АНДРИЖИЕВСКИЙ, В. И. ЗАЙЦЕВ, С. Д. КОВАЛЕВ,
В. Б. НЕСТЕРЕНКО, В. Н. ЩУРИН

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ДИНАМИЧЕСКОГО ДВУХФАЗНОГО СЛОЯ ЧЕТЫРЕХОКСИ АЗОТА В ЗАМКНУТОМ КОНДЕНСАТОРЕ СМЕШЕНИЯ

Создание энергетических установок с теплоносителем на основе диссоциирующей четырехокси азота N_2O_4 выдвинуло практическую задачу приема и локализации выбросов пара N_2O_4 в случае срабатывания предохранительных клапанов контура или отдельных аппаратов. Используемые обычно для этих целей сухие газгольдеры [1] имеют значительные габариты и соответственно большую металлоемкость. В связи с этим представляет интерес применение в системах локализации выбросов пара замкнутых барботажных конденсаторов смешения, характеризующихся высокой интенсивностью удельного теплосъема [2—4].

В данной работе представлены результаты экспериментального исследования процессов теплообмена и гидродинамики в двухфазном слое N_2O_4 конденсатора смешения установки ИЯЭ АН БССР «Модель». Принципиальная схема установки приведена на рис. 1.

Экспериментальный участок представлял собой колонну из молибденового стекла (с крышкой и днищем из нержавеющей стали) с внутренним диаметром 56 мм и высотой 1750 мм.

Предварительная подготовка пара N_2O_4 проводилась в системе объемный испаритель — замкнутая емкость подготовки. Начальная степень его перегрева регулировалась спиральным электронагревателем, расположенным на внешней поверхности емкости подготовки. Перегретый пар из емкости подготовки поступал в экспериментальный участок через систему соединительных трубопроводов и барботажный парораспределитель. Последний представлял собой кольцо из трубки $\varnothing 4$ мм с шестнадцатью отверстиями $\varnothing 1$ мм, направленными вниз.

Методика проведения эксперимента предусматривала измерения температуры и давления в емкости подготовки, температур и давлений пара на входе и внутри конденсатора смешения (экспериментального участка), а также высоты динамического двухфазного слоя в начальный и конечный моменты выброса. Расход пара регулировался сменными диафрагмами различного проходного сечения.

В процессе экспериментального исследования получены зависимости объемного паросодержания динамического двухфазного слоя и удельно теплосъема в замкнутом конденсаторе смешения с диссоциирующим теплоносителем от исходных уровней жидкости и приведенных скоростей пара, равных 0,2—1 м и 0,05—3,6 м/с соответственно. Во всех опытах поддерживался постоянный уровень температуры и давления перегретого пара в емкости подготовки и давления насыщенного пара в конденсаторе смешения, которые были равны 423 К, 25 и 4—5 бар соответственно.

Корреляция экспериментальных данных по величинам паросодержания двухфазного динамического слоя в замкнутом конденсаторе смешения с диссоциирующим теплоносителем проводилась на основе функциональных зависимостей вида

$$\varphi = f(W; h_0; l_0), \quad (1)$$

где l_0 — характерный размер, определяемый соотношением $l_0 = \{\sigma/[g(\rho' - \rho'')]\}^{0,5}$. Пример соответствующей (1) графической зависимости экспериментальных значений φ от W и h_0 в начальный момент сброса приведен на рис. 2. Кривые 1—3 построены при исходных уровнях жидкости, равных 0,2; 0,4 и 0,6 м соответственно.

Как следует из рис. 2, паросодержание динамического двухфазного слоя возрастает с увеличением приведенной скорости пара и уменьшением исходного уровня жидкости в конденсаторе смешения. Эти зависимости носят примерно пропорциональный характер при низких приведенных скоростях пара (от 0,05 до 2 м/с). При дальнейшем увеличении W рост паросодержания динамического слоя резко снижается, и оно начинает асимптотически стремиться к некоторому постоянному значению.

Отмеченные закономерности поведения функций $\varphi = f(W)$ и $\varphi = f(h_0)$ в условиях замкнутого конденсатора смешения с диссоциирующим теплоносителем качественно согласуются с выводами для химически инертных веществ, справедливыми для барботажа насыщенного (в отсутствие процесса теплообмена) [5] и перегретого (при наличии теплообмена) [6, 7] пара в проточных барботажных устройствах и конденсаторах смешения. В частности, снижение темпа роста φ при высоких W отмечено в работе [8] для различных химически инертных веществ. Подобное поведение φ объясняется тем, что при некотором насыщении двухфазного слоя паром (которое, согласно [8], наступает при $\varphi = 0,65 \div 0,8$) начинается слияние паровых пузырей и скорость их всплытия резко возрастает. Этот процесс продолжается до тех пор, пока скорость пара не достигнет

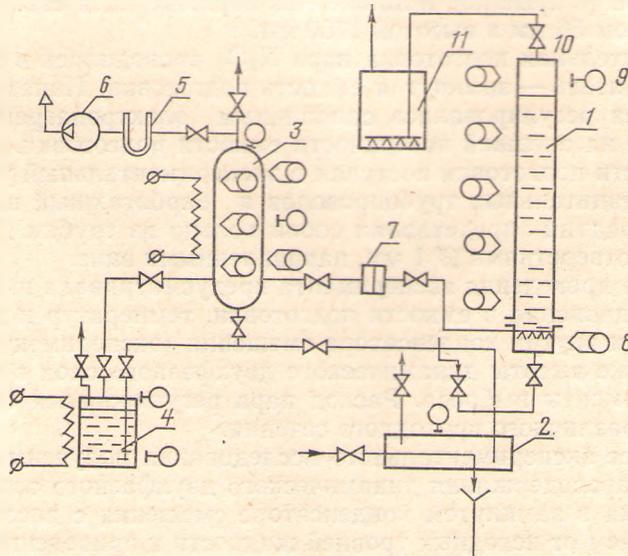


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 — конденсатор смешения; 2 — емкость сырьевая; 3 — емкость подготовки; 4 — испаритель; 5 — ловушка окислов азота; 6 — вакуум-насос; 7 — узел сменных диафрагм; 8 — терморпара; 9 — манометр; 10 — запорная арматура; 11 — нейтрализатор

своего критического значения [9] и не начнется массовый брызгоунос в паровое пространство. Подобное явление отмечено и в данном экспериментальном исследовании в начальные моменты сброса пара в конденсатор смешения.

Необходимо отметить, что использованные при построении кривых 1—3 (рис. 2) значения расходов (и соответственно приведенных скоро-

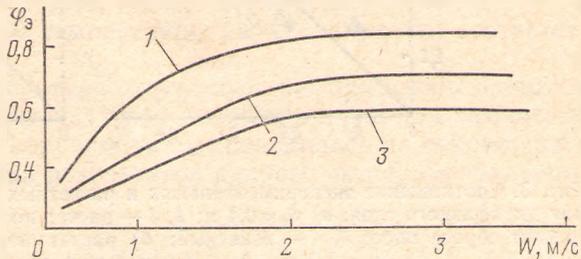


Рис. 2. Зависимость экспериментальных значений объемного паросодержания двухфазного слоя от приведенной скорости пара: 1 — $h_0=0,2$ м; 2 — $0,4$; 3 — $h_0=0,6$

стей пара) в начальный (и конечный) момент сброса получены расчетным методом с привлечением системы уравнений вида

$$G = \left(\frac{S_{\tau}^2 2g\rho_{\tau}^*}{\xi} \right)^{0,5} (\Delta P)^{0,5}, \quad (2)$$

$$M_{\sigma} = \int_0^{\tau} G dt \quad (3)$$

и экспериментальных зависимостей $\Delta P=f(t)$. Величина ξ в (2) и (3) предполагалась постоянной для конкретного режима сброса, что представляется вполне оправданным, так как основные потери динамического напора пара в соединительной системе (между емкостью подготовки и конденсатором смешения) приходились на диафрагму и барботажный парораспределитель.

В настоящее время имеется ряд критериальных зависимостей, обобщающих экспериментальные данные по значениям φ в барботажных устройствах, испарителях объемного типа и проточных конденсаторах смешения с химически инертными веществами [5—7]. Для корреляции экспериментальных φ в непроточном конденсаторе смешения с диссоциирующим теплоносителем выбраны уравнения работ [5, 6]. Выбор этих уравнений обусловлен тем, что первое из них получено для условий, наиболее близких к условиям проведения данного экспериментального исследования (барботаж пара в присутствии процесса конденсации), а второе найдено на основе большого количества экспериментальных данных по барботажу газа и насыщенного пара (в присутствии процесса теплообмена) различных химически инертных веществ.

На рис. 3, а представлено сравнение экспериментальных ($\varphi_{\text{эксп}}$) и рассчитанных по уравнениям работ [5, 6] ($\varphi_{\text{расч}}$) паросодержаний двухфазного слоя в начальный (светлые точки) и конечный (темные) моменты сброса при начальном уровне жидкости в конденсаторе смешения, равном 0,4 м. Подобное сравнение обнаруживает заметное расхождение опытных и расчетных φ , которое для начальных уровней жидкости $h_0=0,6 \div 1$ м достигает наибольшей величины (среднеквадратичное отклонение до 40%).

В связи с этим было проведено построение аналитической зависимости $\varphi=f(W; h_0)$ на основе графического анализа результатов данного

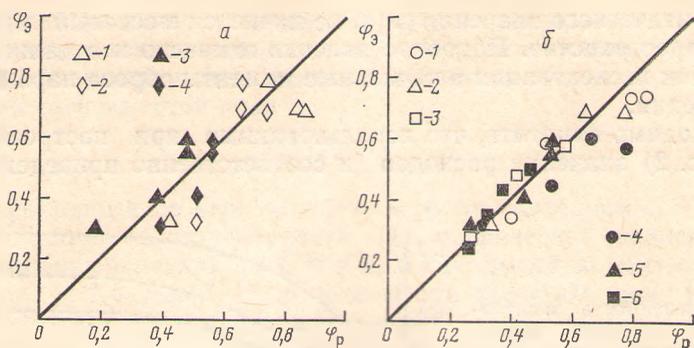


Рис. 3. Соотношение экспериментальных и расчетных значений объемного паросодержания двухфазного слоя: а) $h_0=0,4$ м; 1, 3 — расчет по [6]; 2, 4 — по [5]; 1, 2 — начальный момент сброса пара; 3, 4 — конечный; б) расчет по уравнению (4): 1, 4 — $h_0=0,2$ м; 2, 5 — 0,4; 3, 6 — $h_0=0,6$ м; 1—3 — начальный момент сброса пара; 4—6 — конечный

экспериментального исследования. Полученное при этом уравнение имеет вид

$$\varphi = A (K_w K_{h_0})^{0,39}, \quad (4)$$

где

$$K_w = [W (\rho'_k)^{0,5}] / [g\sigma (\rho'_k - \rho''_k)]^{0,25};$$

$$K_{h_0} = \{\sigma / [g (\rho'_k - \rho''_k)]\}^{0,5} / h_0;$$

$A=5,26$ для начальных моментов сброса ($W=0,5 \div 3,6$ м/с) и $7,1$ — для конечных ($W=0,05 \div 0,5$ м/с).

На рис. 3, б приведены результаты сравнения $\varphi_{\text{эксп}}$ и $\varphi_{\text{расч}}$, где $\varphi_{\text{расч}}$ рассчитано по уравнению (4). Как следует из рис. 3, б, уравнение (4) удовлетворительно описывает экспериментальные данные в исследованном диапазоне теплофизических и динамических характеристик замкнутого конденсатора смешения с диссоциирующим теплоносителем (среднеквадратичное отклонение $\varphi_{\text{эксп}}$ и $\varphi_{\text{расч}} \approx 13\%$ по всем режимам).

В двухфазных системах с развитой межфазовой поверхностью раздела, которая не поддается строгому аналитическому описанию, принято относить удельный теплосъем к единице объема парожидкостного слоя и единичному температурному напору. В соответствии с этим экспериментальные значения коэффициентов теплоотдачи в двухфазном ди-

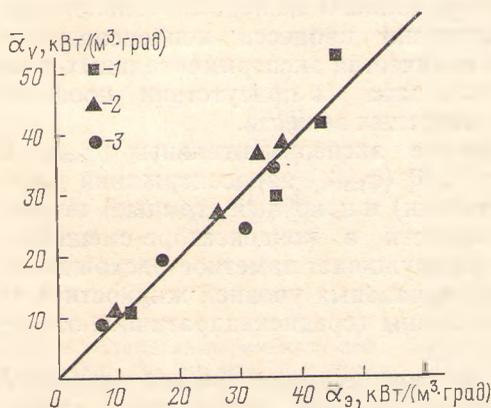


Рис. 4. Соотношение экспериментальных и расчетных значений приведенного коэффициента теплоотдачи в двухфазном слое (расчет согласно (6)): 1 — $h_0=0,2$ м; 2 — 0,4; 3 — $h_0=0,6$ м

намическом слое замкнутого конденсатора смешения установки «Модель» определялись по соотношению

$$\alpha_a = \frac{Q}{V_K(T'' - T')\tau}, \quad (5)$$

где Q — тепло, переданное из емкости подготовки в конденсатор смешения за время τ ; V_K — динамический объем двухфазного слоя; T'' , T' — средние по двухфазному слою температуры пара и жидкости соответственно.

В настоящее время в литературе отсутствует информация о процессе теплообмена в замкнутых конденсаторах смешения даже для химически инертных веществ. Поэтому корреляция α_a проводилась на основе уравнения, полученного из анализа результатов данного экспериментального исследования:

$$\alpha = 0,67 (Re'')^{0,76} \left(\frac{\rho'_k - \rho''_k}{\rho''_k} \right)^{0,45} \left(\frac{h_0}{l_0} \right)^{-0,34}, \quad (6)$$

где $Re'' = (l_0 W)/\nu''$.

На рис. 4 представлено сравнение экспериментальных ($\alpha_{\text{эксп}}$) и рассчитанных по уравнению (6) ($\alpha_{\text{расч}}$) значений среднеобъемных коэффициентов теплоотдачи в динамическом двухфазном слое замкнутого конденсатора смешения с диссоциирующим теплоносителем. Среднеквадратичное отклонение $\alpha_{\text{эксп}}$ и $\alpha_{\text{расч}}$ при этом составило $\approx 12\%$.

Отмеченное выше удовлетворительное согласие уравнений (4), (6) с экспериментальными данными позволяет рекомендовать их для использования при проектировании и создании систем локализации аварийных выбросов и замкнутых конденсаторов смешения с теплоносителем на основе N_2O_4 .

Обозначения

W — приведенная к сечению конденсатора скорость пара; φ — объемное паросодержание двухфазного слоя; h — уровень жидкости в конденсаторе; G — массовый расход пара; ΔP — перепад давлений между емкостью подготовки и конденсатором; S — сечение конденсатора; M — масса пара, перешедшего из емкости подготовки в конденсатор за время сброса; α — коэффициент теплоотдачи; τ — время сброса пара в конденсатор; ρ — плотность; σ — коэффициент поверхностного натяжения; ν — кинематический коэффициент вязкости; g — гравитационное ускорение; ξ — коэффициент сопротивления; f — произвольная функция.

Индексы: '' — пар; ' — жидкость; к — конденсатор; т — соединительная система (диафрагма, трубопровод, барботажный парораспределитель); 0 — начальный.

Summary

The results of experimental investigation and criterial correlation of the values of volume vapor content and specific heat removal in a dynamic two-phase dissociating substance layer are reported.

Литература

1. Веревкин С. И., Корчагин В. А. Газгольдеры. — М.: Химия, 1966, 238 с.
2. Тарат Э. Я., Мухленов И. П., Туболкин А. В., Тумаркина Е. С. Пенный режим и пенные аппараты. — Л.: Химия, 1977, 303 с.
3. Хозе А. Н., Дьяченко Ю. В. Исследование конденсации в динамическом двухфазном слое на горизонтальной трубе. — Изв. вузов. Энергетика, 1978, № 11, с. 140—143.
4. Хозе А. Н., Захаров А. С. Объемный коэффициент теплоотдачи при конденсации водяного пара в проточном динамическом двухфазном слое. — Изв. СО АН СССР. Сер. техн. наук, 1977, вып. 2, № 8, с. 30—33.

5. Алтухов Г. Г., Бартоломей М. С. Определение истинного паросодержания при барботаже на участке стабилизации.— Теплоэнергетика, 1967, № 12, с. 80—81.
6. Хозе А. Н., Шаров Ю. И., Дьяченко Ю. В. Корреляционная зависимость для среднего газосодержания непроточного пенного слоя.— Изв. вузов. Энергетика, 1978, № 10, с. 145—147.
7. Хозе А. Н., Шаров Ю. И. Газосодержание пенного слоя при пониженных давлениях.— ПМТФ, 1970, № 2, с. 122—123.
8. Кутателадзе С. С., Маленков И. Г. Экспериментальное исследование аналогии процессов кипения и барботажа.— ПМТФ, 1966, № 2, с. 140—143.
9. Андрижиевский А. А., Немцев В. А. Определение критической скорости барботажа диссоциирующей четырехокси азота.— Весті АН БССР. Сер. фіз.-энерг. навук, 1975, № 2, с. 105—107.

*Институт ядерной энергетики
АН БССР*

*Поступила в редакцию
16.07.79*