

усилению. Величина полной инверсии  $\sim 10^{16} \text{ см}^{-3}$  типична для мощных импульсных ОКГ и больше чем на порядок превышает значения  $\Delta N$ , достижимые в стационарных разрядах.

Описанная модель весьма чувствительна к газодинамическим характеристикам и конфигурации резонатора и в настоящее время, по-видимому, далека от оптимальной.

Поступила 19 II 1971

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Конохов Б. К., Прохоров А. М. Инверсная населенность при адиабатическом расширении газовой смеси. Письма в ЖЭТФ, 1966, т. 3, вып. 11.
2. Басов Н. Г., Ораевский А. Н., Щеглов В. А. Тепловые методы возбуждения лазеров. Ж. техн. физ., 1968, т. 37, вып. 2.
3. Бирюков А. С., Гордиев Б. Ф., Шелепин Л. А. Колебательная релаксация и инверсная населенность уровней молекулы  $\text{CO}_2$  в нестационарных условиях. ЖЭТФ, 1969, т. 57, вып. 2.
4. Tiffany W. V., Targ R., Foster J. D. Kilowatt  $\text{CO}_2$  gas-transport laser. Appl. Phys. Letters, 1969, vol. 15, No. 3.

УДК 536.24

#### ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОТДАЧИ В ДИНАМИЧЕСКОМ ДВУХФАЗНОМ СЛОЕ ПРИ ПОНИЖЕННЫХ ДАВЛЕНИЯХ

А. Н. Хозе

(Новосибирск)

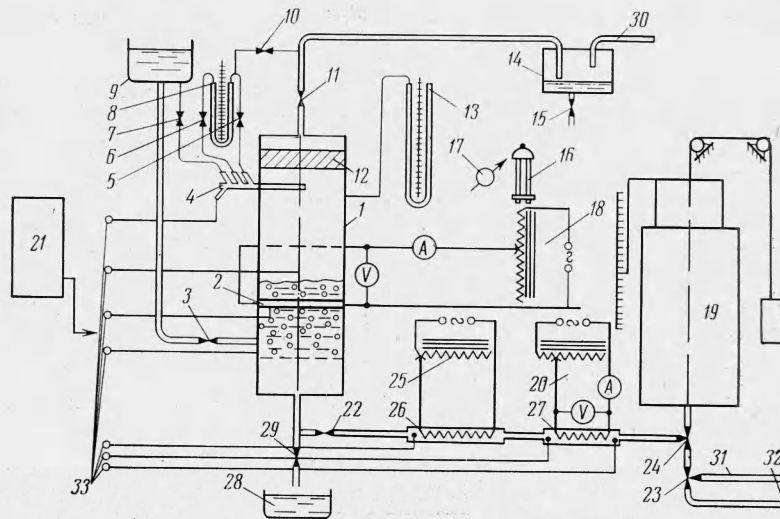
При проектировании аппаратов химической и нефтяной промышленности, теплообменников для транспортных установок и ряда других задач необходимо располагать закономерностями изменения коэффициента теплоотдачи от поверхностей, помещенных в динамический двухфазный слой при пониженных давлениях.

Результаты исследований, приведенных в [1-4], выполнены при атмосферном давлении и их обработка произведена при упрощенных предпосылках. Данная работа посвящена изучению теплоотдачи на цилиндрическом калориметре при приведенной скорости легкой фазы  $W_0'' = (0.5 + 3.5) \text{ м/сек}$ , удельном тепловом потоке  $q = (20 - 120) \text{ ккал/м}^2$ , начальной температуре воздуха  $t_1'' = 15 - 90^\circ \text{ С}$  в диапазоне давлений  $(0.8 - 0.1) \text{ бар}$ . Легкой фазой является воздух, тяжелой — вода.

Необходимо отметить, что при пониженных давлениях существенно уменьшается расход воздуха на  $1 \text{ ккал/час}$  рассеиваемой мощности и возрастает его паросодержание. При этом если при  $p = 1.0 \text{ бар}$  скорость легкой фазы  $W_0''$  определяется величиной только объемного расхода воздуха, то при пониженном давлении необходимо учитывать и объемный расход пара.

На фиг. 1 изображена принципиальная схема экспериментальной установки. Колонна 1 из органического стекла через вентиль 11 и ловушку 14 подключалась к вакуумному насосу ВН-4Г. В верхней части колонны установлен щелевой сепаратор 12 для уменьшения уноса жидкости. Калориметр 2 ( $d = 8 \text{ мм}$ ,  $l = 80 \text{ мм}$ ) питался через автотрансформатор 18. Подогрев воздуха осуществлялся электронагревателем 26, который питался через автотрансформатор 25. Расход воздуха измерялся калориметрическим расходомером 27. Расходомер получал энергию через автотрансформатор 20. При малых расходах воздуха применялся объемный метод с использованием газгольдера 19. Вода поступала в колонну через вентиль 3; ее слив производился через спускной кран 29 в бак 28.

Для измерения влажности паровоздушной смеси на выходе из колонны использовался психрометрический зонд 4 [5]. Реометром 8 измерялась скорость воздуха, протекающего через зонд. Ртутный вакуумметр 13 предназначался для измерения давления в колонне. Барометр 17 и психрометр Ассмана 16 применялись для измерения параметров окружающей среды.



Фиг. 1

На фигуре обозначено: 5, 6, 7, 10, 15, 22, 23, 24 — регулирующие клапаны; 9 — бак для жидкости; 21 — потенциометр; 30 — трубопровод к вакуум-наосу; 31 — воздух из атмосферы; 32 — воздух от компрессора; 33 — термодары.

При проведении экспериментов в рассматриваемом диапазоне давлений наблюдалось устойчивое образование пенного слоя. Однако при  $p < 0.1$  бар,  $W_0'' > 2.0$  м/сек и малых тепловых потоках начиналось местное льдообразование под и над газораспределительной решеткой. При увеличении теплового потока и уменьшении скорости  $W_0''$  обледенение исчезало.

На фиг. 2 в качестве примера даны некоторые зависимости, подтверждающие выводы, полученные при атмосферном давлении: а и б — соответственно зависимость коэффициента теплоотдачи  $\alpha$  от температуры пены  $t^*$  и температуры воздуха  $t_1''$  при  $p = 0.2$  бар,  $W_0'' = 1.5$  м/сек,  $q = 100$  квт/м<sup>2</sup>; в — зависимость  $t^*$  от величины удельного теплового потока  $q$  при  $p = 0.1$  бар и  $W_0'' = 1.5, 1.0, 0.5$  м/сек (кривые 1, 2, 3). В выполненном исследовании, исходя из предположения о несущественной величине теплового потока при испарении пленки жидкости, покрывающей теплообменную поверхность, и пренебрежимо малом тепловом сопротивлении собственно динамического двухфазного слоя (вследствие развитой межфазной поверхности), воспользовавшись известными методами [6], получена следующая критериальная зависимость:

$$S^* = f(K, R^*, W, (\rho' - \rho'') / \rho'', \mu'' / \mu', P') \quad (1)$$

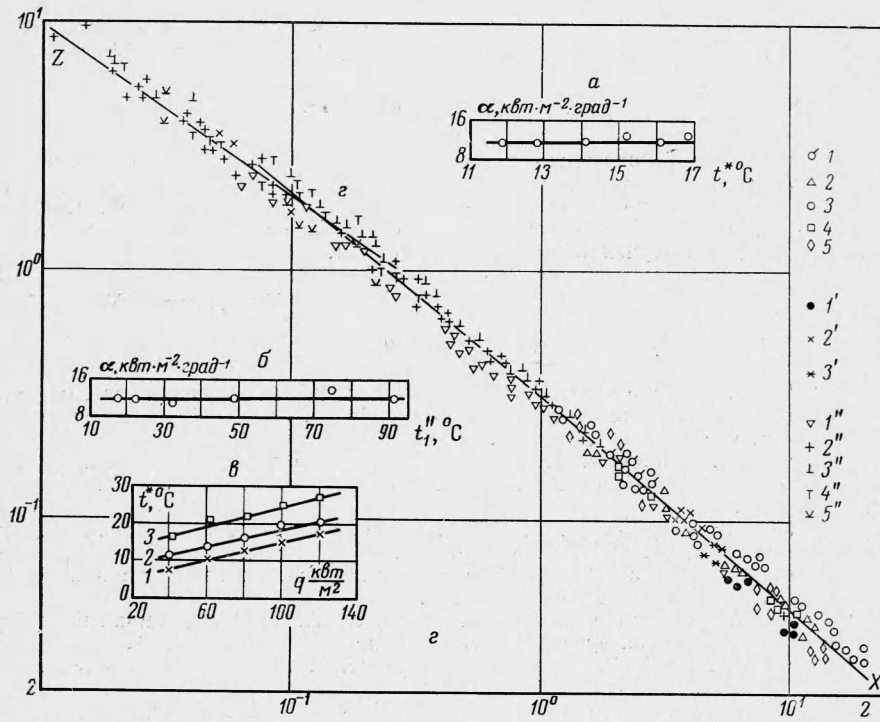
Здесь  $S^*$  — число Стантона, отнесенное к легкой фазе;  $K$  — критерий гидродинамической устойчивости двухфазного потока [7];  $R^*$  — критерий Рейнольдса, отнесенный к кинематическому коэффициенту вязкости тяжелой фазы;  $W$  — критерий Вебера;  $P'$  — критерий Прандтля

$$S^* \equiv \frac{\alpha}{W_0'' C_p' \rho'}, K \equiv \frac{W_0'' \sqrt{\rho''}}{[\sigma g (\rho' - \rho'')]^{1/4}}, R^* \equiv \frac{W_0'' d}{\nu'}, W \equiv \frac{\sigma}{g (\rho' - \rho'') d^2}, P' \equiv \frac{\nu'}{a'}$$

На фиг. 2, г приведена корреляция результатов экспериментов по теплоотдаче в виде

$$Z = f(X), X = (K^2 R^*)^{1/3} \\ Z = S^* p^{1.56} W^{0.07} ((\rho' - \rho'') / \rho'')^{0.35} \quad (2)$$

На фигуре 1 ( $d = 4$  мм), 2 ( $d = 8$  мм), 3 ( $d = 13$  мм), 4 ( $d = 18$  мм) — данные, полученные в [1-4] для системы воздух — вода; 5 ( $d = 8$  мм) — данные, полученные в этом исследовании для системы воздух — вода,  $p = 0.1 \div 0.8$  бар; 1', 2', 3' — данные, полученные в [1-4] для системы воздух — водные растворы олеата Na, глицерина и этилового спирта соответственно; 1'', 2'', 3'', 4'', 5'' — данные, заимствованные из [8, 9], [10], [11], [12], [13] соответственно.



Фиг. 2

По фигуре легко установить значение  $(K^2 R^*)^{1/2}$ , при котором происходит изменение характера представленной функциональной зависимости. Это значение равно примерно  $0.1 \div 0.2$ , и для воздушно-водяных и воздушно-спиртовых сред соответствует переходу от пузырькового режима к барботажному.

Таким образом, для барботажного и развитого барботажного (пенного) режимов имеем

$$S^* = 0.31 K^{-0.56} R^{*-0.28} P^{-0.56} ((\rho' - \rho'') / \rho'')^{-0.35} W^{-0.07} \quad (3)$$

Аналогично получаем для пузырькового режима

$$S^* = 0.37 K^{-0.48} R^{*-0.24} P^{-0.56} ((\rho' - \rho'') / \rho'')^{-0.35} W^{0.07} \quad (4)$$

Для решения практических задач наибольший интерес представляет зависимость (3). Отклонение экспериментальных данных от данных, полученных по зависимостям (3), (4), в преобладающем большинстве экспериментов не превышает  $\pm 10\%$ .

Формулу (3) можно также представить в виде

$$S^* = 0.31 R^{*-0.28} F''^{-0.28} P^{-0.56} ((\rho' - \rho'') / \rho'')^{-0.35} W^{-0.07} \quad (5)$$

Здесь  $F''$  — число Фруда

$$F'' \equiv W_0''^2 / gd$$

Из формулы (5) легко установить, что  $\alpha$  незначительно возрастает с увеличением  $\sigma$  ( $\alpha \sim \sigma^{0.07}$ ), уменьшается с увеличением диаметра  $d$  теплообменного элемента ( $\alpha \sim d^{0.14}$ ) и незначительно понижается с уменьшением плотности газовой фазы  $\rho''$  ( $\alpha \sim \rho''^{0.07}$ ). Поэтому вполне допустимо пренебречь влиянием двух последних комплексов. Заменяя их средними значениями из экспериментов в результате корректировки константы  $C$ , получаем

$$S^* = 0.15 R^{*-0.28} F''^{-0.28} P^{-0.56} \quad (6)$$

Значения  $\alpha$ , получающиеся по уравнению (6), удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными, отклонение не превышает  $\pm (15 + 18\%)$ .  
Ранее в [1, 2] была получена зависимость

$$S^* = 0.108 R^{*-0.26} F^{*0.26} P^{*-0.52} \quad (7)$$

Некоторые отличия константы  $C$  и показателей степени при комплексах по сравнению с (6) объясняются тем, что эта формула получена в результате корреляции опытных данных по теплоотдаче и от поверхности стенки колонны, которая отличается меньшей интенсивностью по сравнению с теплоотдачей цилиндров и шаров, которые использовались для получения зависимости (3), (5).

Поступила 17 VIII 1970

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Х о з е А. Н., Ш а р о в Ю. И. К вопросу теплообмена между нагретой цилиндрической поверхностью и газо-жидкостной пеной. Вопросы радиоэлектроники. Сер. ТРТО, 1968, вып. 1, стр. 84.
2. Т а р а т Э. Я., Х о з е А. Н., Ш а р о в Ю. И. Теплоотдача от одиночных поверхностей в пенном слое. Изв. вузов. Химия и химическая технология, 1969, т. 12, вып. 8.
3. Х о з е А. Н., Ш а р о в Ю. И. Влияние тепловой нагрузки на теплоотдачу в пенном слое. ПМТФ, 1969, № 1, стр. 122.
4. Х о з е А. Н., Ш а р о в Ю. И. Газосодержание пенного слоя при пониженных давлениях, ПМТФ, 1970, № 2, стр. 166.
5. Р ы в к и н С. А., Х о з е А. Н., Я в о р с к и й А. И. Аспирационный психрометрический зонд. Изв. вузов, Приборостроение, 1968, т. 11, № 11.
6. К у т а т е л а д з е С. С., С т ы р и к о в и ч М. А. Гидравлика газожидкостных систем. М.—Л., Госэнергоиздат, 1958.
7. Пристенная турбулентность. Новосибирск. Изд-во СО АН СССР, 1968.
8. С о к о л о в В. Н., С а л а м а х и н А. Д. Теплоотдача от газо-жидкостной системы к стенке теплообменного элемента при барботажном режиме. Ж. прикл. химии, 1962, т. 35, вып. 5.
9. С о к о л о в В. Н., Б у ш к о в М. Д. Конвективный теплообмен между газожидкостной смесью и стенкой. Сб. «Процессы химической технологии». М.—Л., «Наука», 1965.
10. K ö l b e l H., L a n g e m a n n H. Wärmeübergang in Blasensäulen, Erdoel. Z. Bohr — und Fördertechnik, 1964, Bd 80, Nr 10.
11. Y o s h i t o m e H i r o h i, M a n n a k i Y o s h i t o k a, M u k a i K o z u h i r o, Y o s h i k o s h i N a r i m i t s u, K a n a z a w a, T a k a k i, K a g a k u K o g a k u Heat transfer in bubble bed. Air-water system, Japan, 1965, vol. 29.
12. M a r u c c i G., A p u z z o G. Trasporto di calore entro apparecchiature a gorgogliamento. Termotecnica, 1967, vol. 21, No. 3.
13. F a i r J. R., L a m b r i g h t A. J., A n d e r s e n J. W. Heat transfer and gas hold-up in a sparge contactor. IEC Process Design and Development, 1962, vol. 1, No. 1.