

## ИССЛЕДОВАНИЕ АДГЕЗИИ ТВЕРДОГО ДИОКСИДА УГЛЕРОДА К ВЫМОРАЖИВАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

Канд. техн. наук В. Н. ЩЕЛКУНОВ,  
Н. З. РУДЕНКО

При производстве твердого диоксида углерода ( $\text{CO}_2$ ) путем вымораживания его из газовых смесей возникает потребность в специальных механизмах очистки стенок вымораживателя. Для их создания необходимо располагать данными об адгезионной прочности намороженного слоя  $\text{CO}_2$  в условиях сдвига. В литературе такой информации нет.

Из работ, посвященных исследованию адгезии льда к различным конструкционным материалам, [1—3] известно, что сила сцепления контактирующих поверхностей зависит от многих факторов: свойства материала стенки вымораживателя, состояния и температуры ее поверхности, структуры образующегося слоя льда, реальной площади контакта взаимодействующих поверхностей и т. д. Следовательно, определить адгезионную прочность намороженного слоя  $\text{CO}_2$  можно только в ходе эксперимента.

Цель проведенных экспериментов — установить адгезионную прочность слоя твердого  $\text{CO}_2$  различной плотности, намораживаемого на поверхности пластин, выполненных из меди и нержавеющей стали, и, кроме того, исследовать возможность ее снижения путем повышения температуры поверхности контакта в момент отрыва.

Исследования проводили на криогенной газодинамической установке [4] с применением специального оборудования (рис. 1).

Вымораживание  $\text{CO}_2$  из газовой смеси  $\text{N}_2 - \text{CO}_2$  осуществлялось на полированной поверхности пластины в условиях поперечного обтекания газовым потоком. Пластины припаивали к стакану из нержавеющей

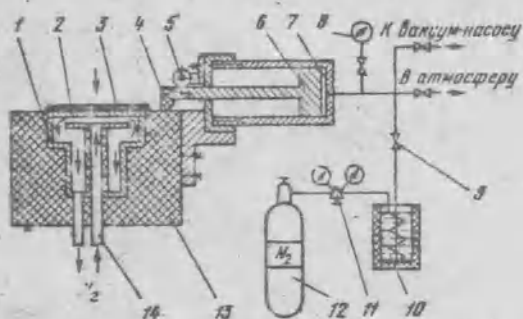


Рис. 1. Схема устройства для определения адгезионной прочности намороженного слоя  $\text{CO}_2$ : 1 — стакан; 2 — пластина; 3 — слой твердого  $\text{CO}_2$ ; 4 — скребок; 5 — направляющий ролик; 6 — поршень; 7 — камера; 8 — манометр; 9 — вентиль; 10 — вымораживатель; 11 — редуктор; 12 — баллон с газообразным азотом; 13 — теплоизолятор; 14 — трубопровод

стали, помещенному в теплоизолятор, и охлаждали ее газообразным азотом. Температуру пластины регулировали с точностью  $\pm 0,5$  К изменением расхода азота и контролировали термометром сопротивления ТЭМ 006-04. Намороженный слой сдвигался фторопластовым скребком, установленным на штанге поршня. Зазор между пластиной и скребком не превышал 0,2 мм. Необходимое усилие сдвига создавалось повышением давления азота в камере поршня. Азот поступал в камеру из баллона через редуктор, вымораживатель, предназначенный для очистки газа от легкоконденсируемых примесей, и вентиль. Усилие сдвига фиксировалось по показаниям сменных образцовых манометров. Скребок возвращался в исходное положение при вакуумировании камеры.

Эксперименты проводили при следующих условиях: давление газовой смеси  $\text{N}_2 - \text{CO}_2$  0,1 МПа, объемное содержание  $\text{CO}_2$  в смеси 5—18 %, температура газового потока 170—200 К, скорость газового потока 1—7 м/с, температура пластины 91, 106, 121, 151 К.

Слой  $\text{CO}_2$  намораживался в течение 30—60 мин до толщины 3—5 мм по методике [4]. Разная средняя плотность твердого  $\text{CO}_2$  достигалась изменением условий опытов.

Среднюю плотность намороженного слоя определяли расчетным путем: по балансу содержания газообразного  $\text{CO}_2$  в смеси рассчитывали массу твердого  $\text{CO}_2$ , а по геометрическим размерам слоя — его объем.

При определении адгезионной прочности намороженного слоя разрушающую нагрузку относили к площади контакта твердого  $\text{CO}_2$  с охлаждаемой поверхностью пластины.

Анализ полученных данных свидетельствует, что адгезионная прочность намороженного слоя  $\text{CO}_2$  зависит в основном от реальной площади контакта взаимодействующих поверхностей, т. е. от плотности слоя. Зависимость адгезионной прочности слоя твердого  $\text{CO}_2$   $\sigma$  от его средней плотности  $\rho$  для различных условий вымораживания представлена на рис. 2.

Другим немаловажным фактором, влияющим на адгезионную прочность, является структура слоя, определяемая условиями опытов. По сравнению с этими двумя факторами свойства материала пластины и температура ее поверхности не оказывают существенного влияния на значения  $\sigma$ .

Явление когезии — сцепление между кристаллами  $\text{CO}_2$  внутри намороженного слоя — также оказывает некоторое влияние на его адгезионную прочность. Если при плотностях  $\rho > 800$  кг/м<sup>3</sup> слой  $\text{CO}_2$  сдвигался целиком, то при  $\rho < 800$  кг/м<sup>3</sup> в момент сдвига он разрушался, причем размеры частиц уменьшались по мере снижения плотности, а при  $\rho < 400$  кг/м<sup>3</sup> сдвинутый слой  $\text{CO}_2$  представлял собой порошкообразную массу. Учитывая факт разрушения слоя, адгезионную прочность твердого

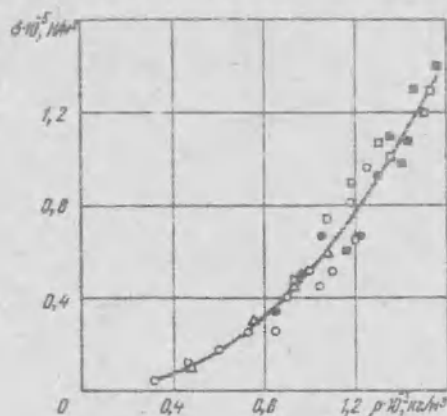


Рис. 2. Зависимость адгезионной прочности слоя твердого  $\text{CO}_2$   $\sigma$  от его плотности  $\rho$  при различных температурах пластины: пластина из меди:  $\circ$  — 91 К,  $\Delta$  — 121 К,  $\square$  — 151 К; пластина из стали 12Х18Н10Т:  $\bullet$  — 106 К;  $\blacksquare$  — 151 К

$\text{CO}_2$  при  $\rho < 800 \text{ кг/м}^3$  следует считать условной величиной.

В результате обработки опытных данных (см. рис. 2) методом наименьших квадратов получена следующая зависимость:

$$\sigma = 0,0129\rho^{2,2}$$

Она справедлива во всем интервале исследованных плотностей ( $300 < \rho < 1550 \text{ кг/м}^3$ ). Среднеквадратичное отклонение экспериментальных значений от расчетных составляет  $\pm 14,3\%$ .

Исследована возможность снижения адгезионной прочности замороженного слоя путем повышения температуры пластины в момент сдвига. С этой целью было проведено семь серий опытов. Краевые условия процесса намораживания в каждой серии опытов поддерживали одинаковыми. Несов-

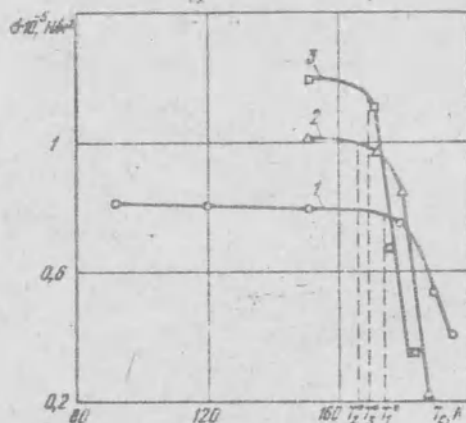


Рис. 3. Влияние повышения температуры пластины в момент сдвига  $T_c$  слоя твердого  $\text{CO}_2$  разной плотности на его адгезионную прочность  $\sigma$ : 1 — начальная температура пластины 91 К, плотность слоя  $1170 \text{ кг/м}^3$ ; 2 — 151 К,  $1350 \text{ кг/м}^3$ ; 3 — 151 К,  $1510 \text{ кг/м}^3$

падение средних плотностей слоя твердого  $\text{CO}_2$  в данных экспериментах составляло не более  $\pm 3\%$ . Температуру пластины повышали в течение 1—3 мин с помощью нагревателя, установленного на стакане (подача хладагента в этот момент прекращалась).

По представленным на рис. 3 кривым видно, что значительное снижение адгезионной прочности (до 50%) наблюдалось только при перегреве пластины на 10—20 К выше равновесной температуры фазового перехода диоксида углерода  $T^*$ , соответствующей исходному парциальному давлению  $\text{CO}_2$ . Эффективность данного способа повышается с увеличением плотности слоя твердого  $\text{CO}_2$ . Это объясняется затрудненностью выхода сублимирующегося газообразного  $\text{CO}_2$  через уменьшенные поры в слое, вследствие чего в полостях, примыкающих к пластине, повышается давление газа, а следовательно, возникает дополнительное усилие отрыва.

Результаты данных исследований будут полезны при проектировании вымораживателей с механической очисткой теплообменных поверхностей от твердого  $\text{CO}_2$ . Такие вымораживатели могут быть использованы как для производства твердого диоксида углерода, так и для повышения эффективности работы аппаратов очистки газовых потоков от  $\text{CO}_2$ .

#### Список использованной литературы

- Добровольский А. П., Сердаков Г. С. Исследование сил смерзания льда со сталью. — Холодильная техника, 1962, № 5, с. 15—16.
- Малышев В. П., Богомолов В. А. Экспериментальные исследования адгезии льда к некоторым конструкционным материалам. — В кн.: Холодильные машины и установки. Л., 1974, с. 75—79.
- Ткачев А. Г., Малышев В. П., Богомолов В. А. Исследование адгезии льда к конструкционным материалам, антикоррозионным и антиобледенительным покрытиям. — Холодильная техника, 1976, № 8, с. 15—18.
- Шелкунов В. Н., Руденко Н. З., Шюстак Ю. В. Экспериментальное исследование процесса вымораживания диоксида углерода из бинарных газовых смесей. — Холодильная техника, 1986, № 5.

УДК 621.564.536.722.001.24

#### МЕТОД РАСЧЕТА ЭНТАЛЬПИЙ ХЛАДАГЕНТОВ

Канд. техн. наук А. В. ТИМОФЕЕВ,  
канд. техн. наук Ю. Д. ВИДИНЕЕВ

Численные эксперименты на ЭВМ при поиске оптимальных решений с поэлементным и пофакторным анализом влияния параметров компрессора и теплообменных аппаратов на эффективность работы комп-