

**ТЕПЛОТДАЧА ЦИЛИНДРА, СООСНОГО  
С РАБОЧИМ ОБЪЕМОМ ЦИКЛОННОЙ КАМЕРЫ  
С ДВУСТОРОННИМ НЕСИММЕТРИЧНЫМ ВВОДОМ ГАЗОВ**

**Засл. деятель науки и техн. России, докт. техн. наук, проф. САБУРОВ Э. Н.,  
канд. техн. наук, доц. СМОЛИНА Н. В.**

*Северный (Арктический) федеральный университет имени М. В. Ломоносова*

E-mail: pyblic@narfu.ru

**HEAT TRANSFER OF CYLINDER BEING COAXIAL  
WITH EFFECTIVE VOLUME OF CYCLONE CHAMBER  
WITH DOUBLE ASYMMETRICAL GAS INLET**

**SABUROV E. N., SMOLINA N. V.**

*Northern (Arctic) Federal University named after M. V. Lomonosov*

Исследование теплоотдачи на поверхности круглого цилиндра при несимметричных условиях ввода газов в циклонную камеру выполнено методом изменения агрегатного состояния греющего агента – слегка перегретого водяного пара, подаваемого в цилиндр-калориметр. Подвод воздуха в циклонную камеру производили с двух диаметрально противоположных сторон через шлицы, расположенные в верхней и нижней ее частях в поперечных плоскостях на относительном расстоянии от торцов, равном  $0,5D_k$ . Несимметрию ввода потока в камеру создавали за счет изменения относительной площади входа в нижней части камеры. Полученные данные обработаны в виде зависимости среднего числа Нуссельта от числа Re и параметра, характеризующего несимметрию ввода.

**Ключевые слова:** цилиндр, теплоотдача, циклонная камера, двусторонний ввод газа.

Ил. 3. Табл. 2. Библиогр.: 3 назв.

Investigation of heat transfer on the surface of a circular cylinder with asymmetrical gas inlet conditions in a cyclone chamber has been executed while changing an aggregate state of heating agent that is slightly superheated steam which is supplied into the cylinder-calorimeter. Air has been supplied into the cyclone chamber from two diametrically opposite sides through the slots in the top and bottom parts of the transverse planes on a relative distance from the ends which is equal to  $0,5D_k$ . Unbalanced stream input into the chamber has been created due to varying the inlet relative area in its bottom part. The obtained data have been processed in the form of dependence of the average Nusselt number on Re number and a parameter characterizing the asymmetry of the inlet.

**Keywords:** cylinder, heat transfer, cyclone chamber, double gas inlet.

Fig. 3. Tab. 2. Ref.: 3 titles.

Рассматриваемая задача представляет интерес для расчетов и разработки циклонных нагревательных и охлаждающих устройств различного технологического назначения, теплообменников, рекуператоров, аппаратов, совмещающих функции циклонного сепаратора и теплоуловителя и т. д. Имеющиеся в литературе рекомендации по расчету теплоотдачи цилиндра в циклонном потоке относятся в основном к циклонным камерам с односторонним приторцевым вводом газов [1–3]. Исследование теплоотдачи на поверхности круглого цилиндра при двустороннем приторцевом несим-

метричном относительно среднего сечения вводе газов в циклонную камеру выполнено методом изменения агрегатного состояния греющего агента – слегка перегретого (на 2–3 °С) водяного пара, подаваемого в цилиндр-калориметр (рис. 1). Калориметр устанавливали соосно с рабочим объемом циклонной камеры в заданном месте с помощью специальных секций. Общая длина рабочей поверхности калориметра составляла 360 мм, диаметр  $d = 105,3$  мм. Для оценки распределения плотности теплового потока и коэффициента теплоотдачи по длине цилиндра-калориметра его паровой объем был секционирован на восемь равных частей длиной по 45 мм каждая. Толщина технически гладкой стенки калориметра не превышала 1,0–1,5 мм. Калориметр имел снизу охранный участок высотой 30 мм, а его верхний торец был теплоизолирован текстолитовым диском. Равномерность раздачи пара по рабочим участкам калориметра обеспечивалась перфорированной трубкой. Образовавшийся в опытах на рабочей поверхности калориметра конденсат стекал в сборные тарелки секций и отводился из каждой по латунным трубкам через охранный секцию и гидрозатворы в мерные емкости. Обогрев охранной секции производили паром, поступающим из продувочного штуцера калориметра. Гидрозатвор создавал небольшое избыточное давление в паровом пространстве калориметра и позволял контролировать уровень конденсата под охранной секцией.

Подвод воздуха в циклонную камеру производили с двух диаметрально противоположных сторон через тангенциальные шлицы, расположенные в верхней и нижней ее частях в поперечных плоскостях на относительном расстоянии от выходных торцов, равном  $0,5D_k$ . Среднее сечение камеры, делившее ее на две равные части (верхнюю и нижнюю), определяли координатой  $z$  (рис. 1), совпадающей с осью рабочего объема камеры и равной нулю. Все характеристики, относящиеся к верхней части камеры, в дальнейшем обозначены индексом «1», к нижней – индексом «2». Безразмерное значение  $\bar{z} = z/D_k$ . Несимметрию ввода потока в камеру создавали за счет изменения относительной площади входа  $\bar{f}_{вх1} = 4f_{вх1}/(\pi D_k^2)$  установкой в шлицах специально спрофилированных вкладышей. При этом она могла принимать значения, равные 0,02; 0,04; 0,06; 0,08, а параметр  $\bar{f}_{вх2} = 4f_{вх2}/(\pi D_k^2)$  сохранял постоянное значение 0,04. Относительный параметр  $\bar{f}_{вх1}/\bar{f}_{вх2}$  в дальнейшем обозначен  $\tilde{f}_{вх1}$ .

Вывод воздуха производили из верхней и нижней частей камеры через выходные отверстия плоских пережимов с относительным (по отношению к  $D_k$ ) диаметром  $\bar{d}_{вых1} = \bar{d}_{вых2} = 0,8$ . Относительная длина рабочего объема камеры  $\bar{L}_k = L_k/D_k$  составляла 5,25.

В качестве примера в табл. 1 приведены полученные в опытах местные значения чисел Нуссельта  $Nu = \alpha d/\lambda$  ( $\alpha$  – локальный коэффициент теплоотдачи;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности) по длине круглого цилиндра при числе Рейнольдса  $Re = v_{вх}d/\nu$ , равном  $1,9 \cdot 10^5$ . В числе Рейнольдса:  $v_{вх}$  – средняя скорость воздуха в шлицах камеры;  $\nu$  – кинематический коэффициент вязкости потока при входных условиях.

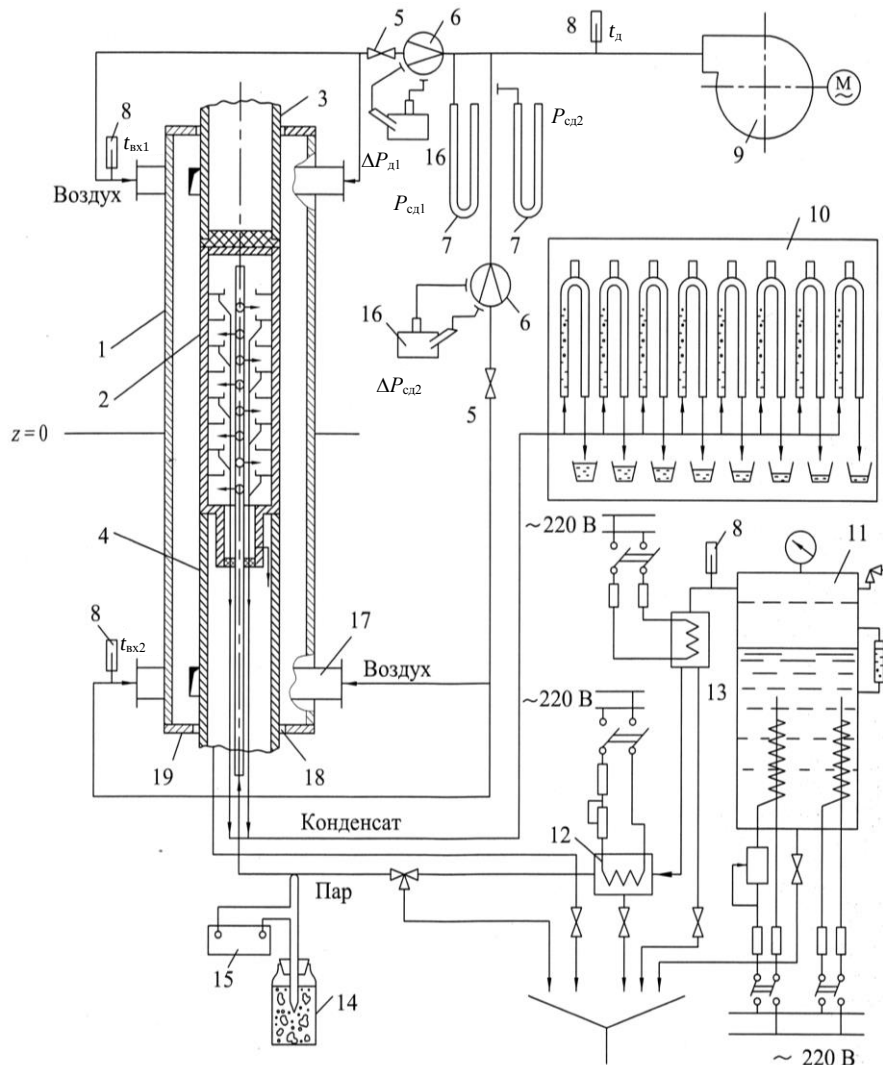


Рис. 1. Схема экспериментального стенда: 1 – циклонная камера; 2 – цилиндр-калориметр; 3, 4 – секция удлинительная, охранная; 5 – заслонка; 6 – нормальное сужающее устройство; 7 – U-образный манометр; 8 – термометр; 9 – воздухоудка; 10 – щит с гидрозатворами; 11 – паровой электротапливатель; 12, 13 – пароперегреватель основной и дополнительный; 14 – сосуд с тающим льдом; 15 – потенциометр; 16 – микроманометр; 17 – тангенциальная щель; 18 – выходное отверстие; 19 – плоский пережим

Таблица 1

Изменение чисел  $Nu$  вдоль цилиндра при различных  $\tilde{f}_{вх1}$

| $\tilde{f}_{вх1}$ | $\bar{z}$ |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|-------------------|-----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|                   | 0         | 0,13 | 0,25 | 0,50 | 0,75 | 1,00 | 1,25 | 1,50 | 1,75 | 2,00 | 2,25 | 2,50 | 2,60 |
| 0,5               | 108       | 106  | 106  | 107  | 109  | 113  | 115  | 115  | 115  | 114  | 128  | 141  | 124  |
|                   | 112       | 113  | 116  | 120  | 123  | 128  | 131  | 136  | 142  | 146  | 163  | 182  | 160  |
| 1,0               | 138       | 139  | 140  | 144  | 149  | 160  | 161  | 160  | 152  | 159  | 181  | 201  | 177  |
|                   | 138       | 139  | 140  | 144  | 149  | 160  | 161  | 160  | 152  | 159  | 181  | 201  | 177  |
| 1,5               | 152       | 154  | 157  | 159  | 163  | 170  | 175  | 179  | 182  | 188  | 202  | 227  | 203  |
|                   | 152       | 153  | 154  | 156  | 158  | 160  | 164  | 170  | 171  | 175  | 196  | 218  | 192  |
| 2,0               | 162       | 164  | 168  | 172  | 174  | 179  | 182  | 187  | 193  | 201  | 214  | 246  | 215  |
|                   | 161       | 161  | 164  | 165  | 167  | 171  | 176  | 182  | 182  | 184  | 199  | 224  | 193  |

Примечание. Верхнее значение в столбце –  $Nu_1$ , нижнее –  $Nu_2$ .

Значения числа Нуссельта в зависимости от числа Рейнольдса при различных величинах параметра  $\tilde{f}_{\text{вх1}}$  приведены на рис. 2.

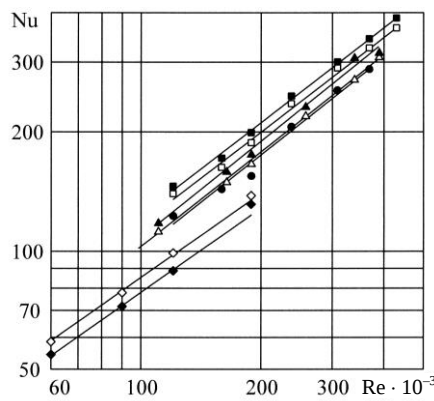


Рис. 2. Зависимость числа Nu от числа Re при различных значениях  $\tilde{f}_{\text{вх1}}$ :  
 $\diamond - \tilde{f}_{\text{вх1}} = 0,5$ ;  $\circ - 1,0$ ;  $\Delta - 1,5$ ;  $\square - 2,0$ ; темные значки –  $Nu_1$ ; светлые –  $Nu_2$

Установлено, что показатель степени  $n$  при числе Рейнольдса в стандартной зависимости вида

$$Nu = c Re^n \quad (1)$$

Таблица 2  
 Изменение показателя степени  $n$   
 в формуле (1) при различных  $\tilde{f}_{\text{вх1}}$

| $\tilde{f}_{\text{вх1}}$ | $n_1$ | $n_2$ |
|--------------------------|-------|-------|
| 0,5                      | 0,70  | 0,72  |
| 1,0                      | 0,80  | 0,80  |
| 1,5                      | 0,82  | 0,80  |
| 2,0                      | 0,79  | 0,80  |

в рассматриваемой задаче изменяется по длине калориметра, а также в небольших пределах и от значения параметра  $\tilde{f}_{\text{вх1}}$  (табл. 2).

Полученные авторами данные были обработаны при  $n = 0,8$  и в виде зависимости среднего числа Нуссельта  $\overline{Nu} = \overline{\alpha} d / \lambda$  ( $\overline{\alpha}$  – среднее значение коэффициента теплоотдачи на поверхности цилиндра) от числа Рейнольдса  $Re$  и безразмерной относительной площади входа  $\tilde{f}_{\text{вх1}}$  (рис. 3).

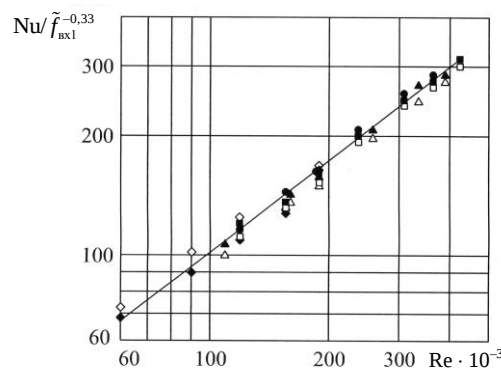


Рис. 3. Средняя теплоотдача на поверхности круглого цилиндра

В результате получено уравнение для расчета средних коэффициентов теплоотдачи на поверхности цилиндра

$$\overline{Nu} = 2,7 Re^{0,8} \tilde{f}_{вх1}^{-0,33}. \quad (2)$$

Отклонение опытных точек от обобщающей кривой не превышает  $\pm 10\%$ .

### ВЫВОД

Полученное авторами уравнение для расчета средних коэффициентов теплоотдачи на поверхности цилиндра, соосного с рабочим объемом циклонной камеры с двусторонними околоторцевыми симметричным выводом и несимметричным вводом газов, правильно определяет особенности конвективного теплообмена в рассматриваемых условиях и может быть рекомендовано для практического использования.

### ЛИТЕРАТУРА

1. С а б у р о в, Э. Н. Исследование теплоотдачи цилиндрической вставки, соосной с рабочим объемом циклонной камеры / Э. Н. Сабуров, С. И. Осташев // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений). – 1979. – № 6. – С. 66–72.
2. С а б у р о в, Э. Н. Циклонные нагревательные устройства с интенсифицированным конвективным теплообменом / Э. Н. Сабуров. – Архангельск: Сев.-Зап. изд-во, 1995. – 344 с.
3. С а б у р о в, Э. Н. Конвективный теплообмен в циклонных секционных нагревательных устройствах / Э. Н. Сабуров, С. И. Осташев // Архангельск: Изд-во Арханг. гос. техн. ун-та, 2004. – 192 с.

### REFERENCES

1. S a b u r o v, E. N., & Ostashev, S. I. (1979) Heat Transfer Investigation of Cylindrical Insert Being Coaxial With Effective Volume of Cyclone Chamber. *Izvestiia Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii – Energetika [Proceedings of the Higher Education Institutions and Power Engineering Associations – Power Engineering]*, 6, 66–72.
2. S a b u r o v, E. N. (1995) *Cyclone Heating Devices with Intensified Convective Heat Transfer*. Arkhangelsk: Northwestern Publishing House.
3. S a b u r o v, E. N., & Ostashev, S. I. (2004) *Convective Heat Transfer in Cyclone Sectional Heating Devices*. Arkhangelsk: Arkhangelsk State Technical University Publishing House.

Представлена кафедрой теплотехники

Поступила 30.05.2013