

С.И. Остаев, Э.Н. Сабуров, А.Н. Соколов

Архангельский государственный технический университет, Россия

АЭРОДИНАМИКА И КОНВЕКТИВНЫЙ ТЕПЛООБМЕН В ЦИКЛОННОМ СЕКЦИОННОМ НАГРЕВАТЕЛЬНОМ УСТРОЙСТВЕ С ЗАГОТОВКАМИ, СМЕЩЕННЫМИ ПАРАЛЛЕЛЬНО АЭРОДИНАМИЧЕСКОЙ ОСИ ГРЕЮЩЕГО ПОТОКА

АННОТАЦИЯ

Приводятся результаты экспериментального и численного исследования аэродинамики и конвективного теплообмена в циклонных секционных нагревательных устройствах с расположением круглых цилиндрических заготовок (проходящих через рабочий объем и выходное отверстие) параллельно оси закрученного потока.

1. ВВЕДЕНИЕ

Смещение заготовки с аэродинамической оси сильно закрученного потока приводит первоначально к потере устойчивости течения в пограничном слое (к предотрывному его состоянию), а при достаточно больших смещениях к появлению отрывов потока на отдельных частях ее боковой поверхности и значительной интенсификации конвективного переноса [1, 2, 3]. Интенсификации конвективного теплообмена способствует сложное поле скоростей атакующего и обтекающего заготовку греющего потока, которое возникает в результате его сильной закрутки, взаимодействия с круглыми цилиндрическими заготовками, влияния радиального градиента давления, а также взаимодействия течений в окрестностях каждой из заготовок.

В работе проанализированы результаты исследования аэродинамики и конвективного теплообмена в циклонных секционных нагревательных устройствах при параллельном смещении заготовки (заготовок) с аэродинамической оси вращения греющих газов.

2. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО СТЕНДА И МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Опыты выполнены на моделях циклонных секционных нагревательных устройств, предназначенных для нагрева штанг перед резкой. Изученная геометрия рабочего объема секций характеризуется следующими параметрами: $D_k = 2R_k = 0.31-0.464$ м, $\bar{L}_k = L_k/D_k = 1.16$, $\bar{d}_{\text{вых}} = 0.4-0.85$, $n_{\text{вх}} = 2$, $\bar{f}_{\text{вх}} = 4 f_{\text{вх}}/\pi D_k^2 = (1.64-4.77)10^2$, $\bar{d}_3 = \bar{r}_3 = d_3/D_k = 0.081-0.280$, $n_3 = 1-3$. При расположении заготовок ($\bar{d}_3 = 0.127-0.280$, $n_3 = 1$) параллельно оси секции безразмерный радиус смещения их осей $r_c = r_c/R_k = 0.065-0.218$. Две заготовки ($\bar{d}_3 = 0.081-0.177$) располагались параллельно в одной плоскости и на одинаковом расстоянии от оси рабочего

объема ($\bar{r}_c = 0.081-0.242$). При наличии третьей заготовки ($n_3 = 3$) ее ось совпадала с осью секции. Для рассматриваемого варианта расположения заготовок характерным диаметром загрузки кроме \bar{d}_3 может быть также принят безразмерный диаметр описанной окружности с центром на оси рабочего объема $\bar{d}_3^{\text{оп}} = d_3^{\text{оп}}/D_k = 0.161-0.355$ ($\bar{d}_3^{\text{оп}} = \bar{r}_c + \bar{d}_3$).

Заготовка – калориметр позволяла определять средние коэффициенты теплоотдачи. Изучение конвективного теплообмена производилось по методике, основанной на изменении агрегатного состояния греющего агента. В аэродинамических опытах применялись зондовые методы. Визуализация потока частично проводилась на гидравлических моделях. Картина движения потока анализировалась с помощью его видеозаписи, использовался численный эксперимент.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для обоснования физических особенностей тепловой работы секции циклонного нагревательного устройства с расположением заготовок параллельно оси рабочего объема предварительно выполнены опыты по исследованию аэродинамики ее рабочего объема.

При расположении заготовок в один и два ручья (на одинаковом расстоянии от оси рабочего объема) распределения аэродинамических характеристик потока за пределами $\bar{d}_3^{\text{оп}}$ аналогичны ранее рассмотренным [1, 2] для сплошных заготовок с $d_3 = \bar{d}_3^{\text{оп}}$. Во внутреннем пространстве, ограниченном описанной окружностью, вращение основного потока существует лишь при значительной радиальной протяженности этой зоны.

Сопоставление аэродинамических характеристик потока при рассматриваемых видах загрузки и загрузке секции соосной круглой заготовкой [1] следует, что расхождение в их значениях $\bar{w}_{\text{фм}}$ (максимума тангенциальной скорости), $\bar{r}_{\text{фм}}$ (радиуса положения $\bar{w}_{\text{фм}}$), \bar{p}_c (статического давления), \bar{p}_n (полного давления) не превышает 5–7%. Это позволяет для их расчета использовать методику, рекомендуемую для определения аэродинамических характеристик в циклонных секционных устройствах, загруженных круглой соосной с рабочим объемом секции заготовкой [2]. При достаточно

больших характерных диаметрах, представляющих наибольший практический интерес, диаметр заготовок еще в меньшей степени будет влиять на определяемые по методике расчета [2] аэродинамические характеристики потока.

Во внутренней области рабочего объема, ограниченной диаметром $\bar{d}_3^{\text{оп}}$, поток имеет сложную кинематическую структуру (рис. 1). В зависимости от геометрических параметров циклонного нагревательного устройства здесь наблюдаются два характерных варианта движения потока.

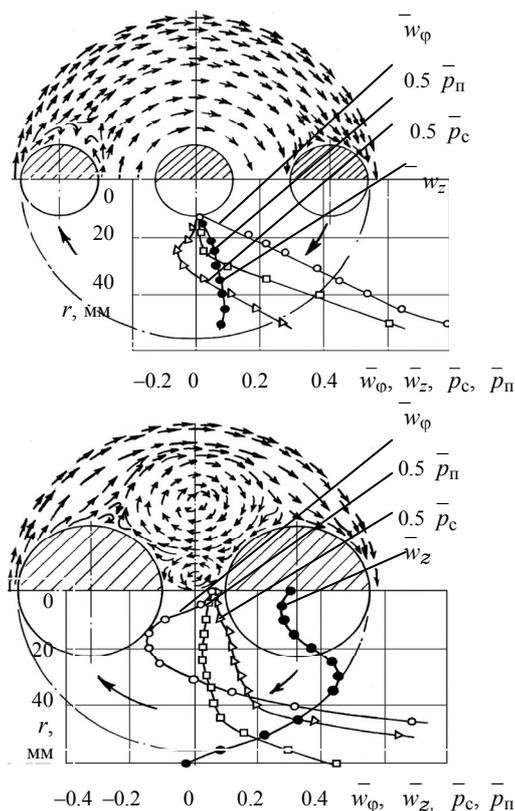


Рис. 1. Схема течения и распределения скоростей \bar{w}_ϕ , \bar{w}_z и давлений \bar{p}_n , \bar{p}_c в окрестности заготовок при трех- и двухручьевом их расположении (сечение перпендикулярно оси рабочего объема нагревательного устройства)

Первый имеет место в циклонном сконцентрированном потоке [1], когда положение максимума тангенциальной скорости перестает зависеть от геометрии сечения и определяется только характерным диаметром загрузки. В этом случае ($\bar{d}_3 = 0.081$, $\bar{d}_3^{\text{оп}} = 0.355$), независимо от наличия центральной заготовки, движение потока по направлению совпадает с основным. Боковые заготовки не меняют характер течения, тангенциальные скорости значительно превышают осевые. Центральная заготовка приводит к уменьшению разрежения в приосевой области, а следовательно, к снижению общего сопротивления циклонного нагревательного устройства. Возникающий при этом прямой осевой ток препятствует проникновению обратного осевого потока в глубь рабочего объема сечения. Сечение, где наблюдается взаимное гашение токов, распо-

гается вблизи выходного отверстия. В выходном отверстии осевое обратное течение практически ликвидируется и появляется застойная зона, радиальный размер которой близок к характерному диаметру загрузки. С увеличением диаметра загрузки (уменьшением реальной площади выхода газов) создаются условия для образования вторичных локализованных вихревых течений между заготовками.

Для второго варианта движения газов ($\bar{d}_3 = 0.113$, $\bar{d}_3^{\text{оп}} = 0.355$) во внутренней зоне наблюдаются локализованные вихревые течения с интенсивным осевым стоком газов из рабочего объема. Аксиальная компонента полной скорости вихревых течений превышает тангенциальную (рис. 1). По направлению к глухому торцу рабочей камеры интенсивность вихревых потоков снижается. Картина обтекания боковых заготовок имеет ряд особенностей, т.к. во внутренней области (между заготовками) не наблюдается вращения, индуцированного основным потоком.

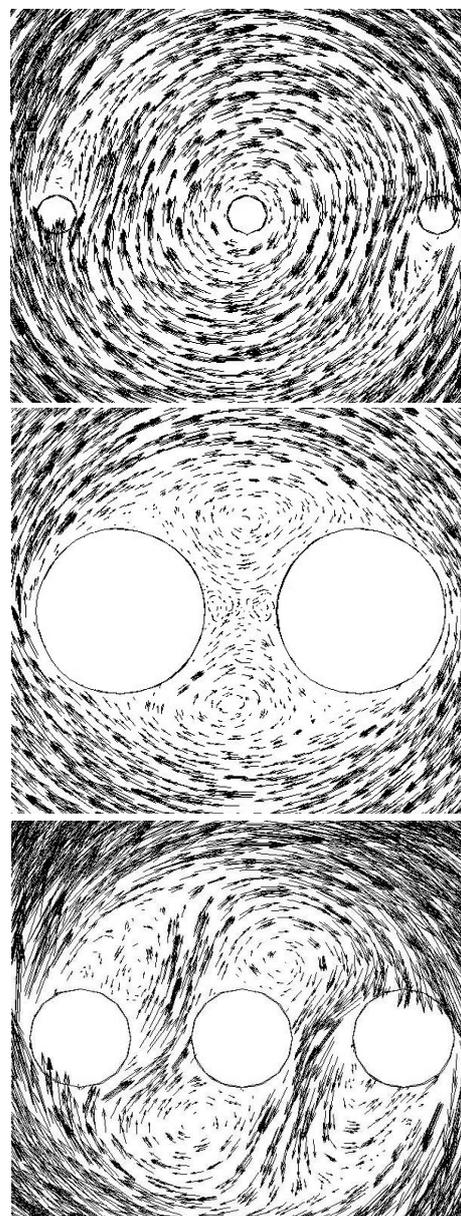


Рис. 2. Результаты расчета полей векторов скорости потока вблизи поверхностей заготовок

Некоторые результаты численного анализа аэродинамики циклонного секционного нагревательного устройства со смещенными в пределах выходного отверстия заготовками приведены на рис. 2. Из рис. 2 следует, что основные изменения в картине движения потока наблюдаются во внутренней его области, ограниченной характерным диаметром загрузки. Расчеты показали, что при трехручьевом расположении заготовок может существовать еще один (промежуточный) вариант движения газа в приосевой области рабочего объема. В промежуточном варианте ($\bar{d}_3 = 0.113$, $\bar{d}_3^{\text{оп}} = 0.355$) наблюдается зарождение у поверхности центральной заготовки двух локальных вихревых течений. При этом между заготовками сохраняется проточное течение, по направлению совпадающее с основным, а у боковых заготовок – наличие отрывных зон. Образованный таким образом деформированный вихревой поток изменяет характер обтекания центральной заготовки.

При $\bar{d}_3^{\text{оп}}$, меньшем или равным значению радиального размера зоны осевого обратного тока в выходном отверстии, коэффициент сопротивления $\zeta_{\text{вх}}$ ($\zeta_{\text{вх}} = 2\Delta p_{\text{п}}/\rho_{\text{вх}}V_{\text{вх}}^2$) секции находится на уровне коэффициента сопротивления незагруженной камеры $\zeta_{\text{вх}0}$. Это соответствует условию $\bar{d}_3^{\text{оп}} \leq \bar{d}_{\zeta 0}$, где $\bar{d}_{\zeta 0} = d_{\zeta 0}/D_{\text{к}}$ – предельно допустимый относительный диаметр заготовки (при $\bar{d}_3^{\text{оп}} > \bar{d}_{\zeta 0}$ наблюдается резкое увеличение $\zeta_{\text{вх}}$ с уменьшением площади выходного проходного сечения) [2].

Установлено, что в рассмотренных диапазонах безразмерных диаметров выходного отверстия экспериментальные данные можно обобщить единой зависимостью вида

$$\frac{\zeta_{\text{вх}}}{\zeta_{\text{вх}0}} = \frac{0.78}{1.52 + \left(\frac{\bar{d}_3}{\bar{d}_{\zeta 0}}\right)^{4.61}} + 0.5. \quad (1)$$

По уравнению (1) можно рассчитать коэффициенты сопротивления циклонных нагревательных устройств и с тремя расположенными в одной плоскости заготовками, когда ось средней из них совпадает с осью камеры, а две другие находятся на одинаковом от нее расстоянии.

Смещение заготовки во всех случаях приводит к интенсификации теплоотдачи. Например, смещение заготовки $\bar{d}_3 = 0.081$ до значения $\bar{r}_c = 0.279$ ($\bar{d}_3^{\text{оп}} = 0.36$) интенсифицирует теплоотдачу на 85 %. Практически такой же уровень теплообмена (в рассмотренном диапазоне \bar{r}_c) наблюдается на поверхности двух параллельно расположенных на одинаковом расстоянии от оси секции заготовках, даже если между ними есть еще третья заготовка. В то же время теплоотдача на поверхности центральной заготовки целиком определяется величиной смещения боковых заготовок. Например, для заготовок $\bar{d}_3 = 0.081$, соприкасающихся поверхностями ($\bar{d}_3^{\text{оп}} =$

$= 0.243$), теплоотдача центральной и боковых заготовок практически одинакова. При этом интенсивность теплоотдачи на поверхности центральной заготовки в рассматриваемом случае на 20 % выше, чем для одиночной заготовки, соосной с секцией. Конвективный теплообмен в данном случае практически полностью определяется вторичными течениями у поверхности заготовок, интенсивность которых зависит от уровня скоростей в рабочем объеме секции и расположения максимума тангенциальной скорости относительно смещенных заготовок [3]. Аналогичный механизм обтекания заготовок, приводящий к росту уровня теплоотдачи до 25 %, наблюдается до значения $\bar{d}_3^{\text{оп}} = 0.28$. Дальнейшее увеличение $\bar{d}_3^{\text{оп}}$ приводит к появлению вращения газов около центральной заготовки по направлению, совпадающему с основным. Обтекание поверхности центральной заготовки, а следовательно, и интенсивность теплоотдачи становятся такими же, как и одиночной заготовки, соосной с рабочим объемом.

Увеличение диаметра смещенной заготовки (в рассмотренном диапазоне \bar{d}_3) при сохранении $\bar{d}_3^{\text{оп}}$ приводит к повышению интенсивности теплоотдачи на 15 %. Значительное уменьшение коэффициентов теплоотдачи происходит с увеличением диаметра выходного отверстия из-за снижения общего уровня скоростей в рабочем объеме циклонного секционного устройства. Например, при увеличении $\bar{d}_{\text{вых}}$ от 0.4 до 0.6 ($\bar{d}_3^{\text{оп}} = 0.355$) коэффициент теплоотдачи на поверхности заготовки уменьшается на 58 %.

Геометрические характеристики \bar{d}_3 , \bar{r}_c и $\bar{d}_{\text{вых}}$ являются параметрами, которые определяют интенсивность конвективного теплообмена к смещенной заготовке. Следовательно, для расчета теплоотдачи на поверхности заготовки, расположенной параллельно оси рабочего объема циклонного нагревательного устройства, может быть рекомендована зависимость (рис. 3)

$$\text{Nu} = 0,087 \text{Re}_{\text{от}}^{0,7} \varepsilon_{\Gamma}, \quad (2)$$

где ε_{Γ} – геометрический комплекс, $\varepsilon_{\Gamma} = \left[\frac{\bar{r}_c + \bar{d}_3}{\bar{d}_{\text{вых}}} \right]^{0,85}$.

В формуле (2) в качестве определяющих параметров для чисел Nu (Нуссельта) и $\text{Re}_{\text{от}}$ (Рейнольдс-

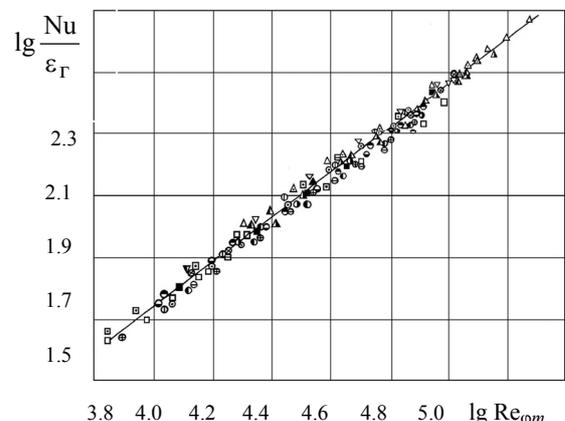


Рис. 3. Теплоотдача на поверхности заготовки параллельной оси секции

са) выбраны: диаметр заготовки, скорость $w_{\text{фм}}$ и средняя в рабочем объеме секции температура потока. Уравнение справедливо при $7.94 \cdot 10^3 \leq \text{Re}_{\text{фм}} \leq 1.91 \cdot 10^5$ и значении геометрического комплекса $\varepsilon_{\text{г}} = 0.403 - 0.887$. Вероятное относительное среднеквадратичное отклонение опытных точек от обобщающей кривой при $P = 0.95$ не превышает $\pm 10.9\%$.

Результаты численного моделирования теплообмена в циклонной секции нагревательного устройства (скорость продуктов сгорания на выходе из горелки 150 м/с при температуре 1600 °С, температура металла 350 °С, температура газов в тамбуре 1100 °С) показали, что наибольшие значения у коэффициентов теплоотдачи наблюдаются на поверхности заготовки в области максимальных скоростей основного потока вблизи выходного отверстия, а наименьшие — у глухого торца в области зарождающихся вихревых течений (рис. 4).

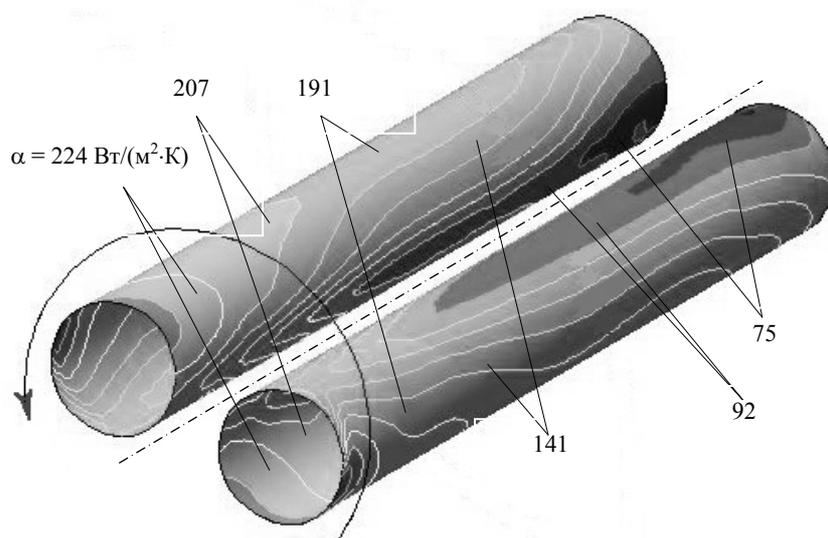


Рис. 4. Результаты расчета коэффициентов теплоотдачи на поверхности заготовок при параллельном смещении

При двухручьевом расположении заготовок достигается не только интенсификация конвективного теплообмена на их поверхности, но и по сравнению с одноручьевым — повышение степени заполнения рабочего объема, т.е. существенное увеличение производительности циклонной секции нагревательного устройства.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты представляют интерес с точки зрения создания методики расчета циклонных секционных нагревательных устройств с расположением заготовок параллельно оси греющего потока, а также разработки методов интенсификации конвективного теплообмена в них.

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

$D_{\text{к}}, L_{\text{к}}$ – диаметр, длина рабочего объема секции, м;
 f – площадь, м²;
 d – диаметр, м;
 n – количество заготовок, каналов ввода потока, шт;
 V, w – скорость потока, м/с;
 $\Delta P_{\text{п}}$ – перепад полного давления в циклонном нагревательном устройстве, Па;
 $\zeta_{\text{вх}}$ – коэффициент сопротивления;
 p – давление, Па;
 ρ – плотность потока, кг/м³;
 α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К).

Индексы:

φ, z – параметры для тангенциальной и аксиальной компонент вектора полой скорости;
 вх – параметр для входных условий;
 вых – параметр для выходных условий;
 z – параметр для заготовки;
 c – параметр для смещения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Сабуров Э.Н.** Циклонные нагревательные устройства с интенсифицированным конвективным теплообменом. Архангельск: Сев.-Зап. кн. изд-во, 1995. 341 с.
2. **Сабуров Э.Н., Осташев С.И.** Аэродинамика циклонных секционных нагревательных устройств / Под ред. Э.Н. Сабурова. Архангельск: Арханг. гос. техн. ун-т, 2005. 288 с.
3. **Сабуров Э.Н., Осташев С.И.** Конвективный теплообмен в циклонных секционных нагревательных устройствах / Под ред. Э.Н. Сабурова. Архангельск: Арханг. гос. техн. ун-т, 2004. 192 с.