

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ВНЕШНЕГО ТЕПЛООБМЕНА ТЕЛ, ЧАСТИЧНО ПОГРУЖЕННЫХ В ПСЕВДООЖИЖЕННЫЙ СЛОЙ, ГЕТЕРОГЕННЫМИ СТРУЯМИ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ЗАТРАТЫ НА ОСУЩЕСТВЛЕНИЕ ПРОЦЕССА

В.Ю. Красных¹, С.А. Нагорнов², В.Н. Королев¹

*ГОУ ВПО «Уральский государственный технический университет» (1);
Всероссийский научно-исследовательский и проектно-технологический
институт по использованию техники и нефтепродуктов
в сельском хозяйстве, г. Тамбов (2)*

Представлена членом редколлегии профессором Н.Ц. Гатаповой

Проблема повышения эффективности процессов внешнего теплообмена с использованием неоднородного псевдоожигенного слоя является актуальной. Важными моментами решения этой проблемы являются снижение удельных энергетических затрат на его осуществление и повышение интенсивности теплоотдачи [1].

В настоящее время псевдоожигенные системы широко используются в качестве промежуточного теплоносителя и применяются во многих отраслях промышленности. Например [1], при осуществлении теплонапряженных процессов, связанных с нагревом или охлаждением металлических изделий, сушки и гранулирования, химической и термической обработки разнообразных материалов, низкотемпературного сжигания твердого топлива в топках котлоагрегатов, а также в теплообменных аппаратах различного назначения. Часть изделий, подвергающихся термообработке, а также элементы теплообменных аппаратов, котлов и топок с псевдоожигенным слоем могут иметь неправильную форму, большие габаритные размеры и поэтому выступать из псевдоожигенного слоя (из его основной зоны) или плавать на его поверхности (например, при вулканизации длинномерных изделий). В результате верхняя часть поверхности находится в контакте с воздухом или с сильно разбавленной дисперсной фазой, а нижняя часть изделия погружена в псевдоожигенный слой. Значительное различие в интенсивности теплообмена с воздухом и слоем (более чем на порядок) отрицательно сказывается как на качестве термообрабатываемого изделия, так и на эффективности процесса теплообмена в целом, и тем больше, чем сильнее выступает тело из слоя.

Анализ литературных данных показывает [1–4], что практически отсутствует информация об интенсификации внешнего теплообмена для тел, плавающих в псевдоожигенном слое. А для длинномерных тел или тел неправильной формы, которые могут выступать из слоя, такая информация практически отсутствует.

Исходя из этого нами была поставлена задача – исследовать возможность интенсификации процесса внешнего теплообмена за счет направленного на выступающую поверхность частично погруженных в псевдоожигенный слой тел гетерогенных струй, а также энергетические затраты связанные с этим.

Под гетерогенной струей понимается поток частиц дисперсной фазы и оживающего агента, образующийся в полой трубке (сопле), вертикально погруженной в псевдоожигенный слой и истекающий (фонтанирующей) из непогруженного в псевдоожигенный слой торца этой трубки. Гетерогенные струи формируются без дополнительных затрат энергии, используя оживающий агент в качестве транспортирующей среды, на основе явления квазикапиллярности, заключающееся в увеличении высоты уровня дисперсной среды в трубке при погружении ее в

псевдооживленный слой над слоем вне трубки [2]. В псевдооживленных средах это явление связано с тем, что соприкосновение сыпучего материала с жесткой стенкой нарушает случайную хаотическую структуру пристенного слоя и упорядочивает ее на глубину трех-четырех диаметров частиц. Это приводит к возрастанию гидравлического радиуса, то есть уменьшению сопротивления и увеличению проходного сечения для газа [3]. Средняя порозность в пристенной зоне трубки в 1,1–1,4 раза, а скорость газа в 1,2–2,0 раза больше, чем в слое.

Псевдооживленный слой создавался в аппарате квадратного сечения 150×150 мм, высотой 300 мм. В качестве материала дисперсной среды использовались частицы корунда с эквивалентным диаметром – $d_q = 0,51$ и $0,13$ мм, псевдооживляемые воздухом. В опытах использовалась провальная решетка с оптимальным (с точки зрения эффективности процесса внешнего теплообмена) живым сечением $\varphi = 9,82\%$ [4] и относительным гидравлическим сопротивлением решетки (по отношению к сопротивлению слоя) на рабочих режимах от 0,1 до 0,2, толщиной 3,5 мм. Высота насыпного слоя H_0 изменялась от 45 до 120 мм. В качестве тел, частично погруженных в псевдооживленный слой, использовались полые цилиндры, выполненные из алюминия диаметром D и длиной L с вмонтированными в них нагревателем и четырьмя термодатчиками, размещаемыми в слое горизонтально. Диаметр цилиндров изменялся от 25 до 55 мм, а длина от 50 до 150 мм. Толщина стенки всех цилиндров 3 мм. Температура слоя измерялась термодатчиками в двух точках аппарата. Средний коэффициент теплоотдачи между псевдооживленным слоем и поверхностью теплообмена определялся по стационарной методике через тепловой поток Q и температурный напор ΔT ($\alpha = Q / F_T \Delta T$).

Для формирования гетерогенных струй в аппарате с псевдооживленным слоем в направляющих зажимах симметрично его продольной оси вертикально устанавливались изогнутые сопла (рис. 1) цилиндрической формы (полые трубки с внутренним диаметром $d_{тр}$), нижние части которых были погружены в псевдооживленный слой и имели на концах горизонтальные площадки кольцевой формы диаметром $d_{п}$, верхние – изогнуты к продольной оси аппарата. Сопла могли перемещаться по высоте слоя и устанавливались так, чтобы загнутые концы были сориентированы на поверхности теплообмена. Гетерогенные струи подавались на цилиндры с помощью стальных трубок $d_{тр} = 6$ мм. Наружный диаметр площадок – $d_{п} = 24$ мм.

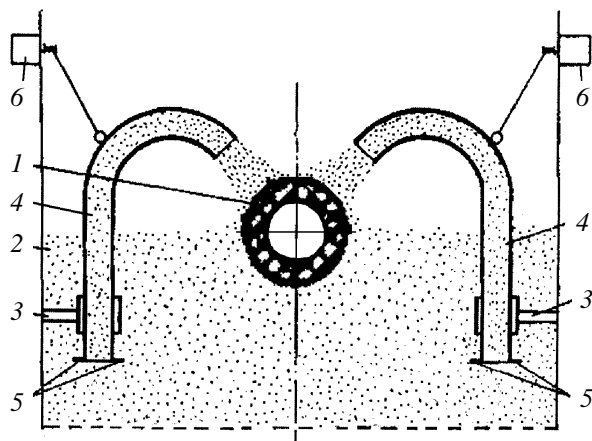


Рис. 1. Схема интенсификации внешнего теплообмена струями для тел, частично погруженных в псевдооживленный слой:

1 – цилиндр; 2 – аппарат с псевдооживленным слоем; 3 – направляющие; 4 – сопла; 5 – горизонтальные площадки; 6 – механизм для изменения глубины погружения сопла в слой

На рис. 2 показаны результаты экспериментов по исследованию влияния гетерогенных струй на интенсивность внешнего теплообмена тел, частично погруженных в псевдооживленный слой, при различных числах псевдооживления.

Использование гетерогенных струй при обработке поверхности, выступающей из слоя, позволяет существенно интенсифицировать процесс внешнего теплообмена (в приведенном примере на 23 %).

При взаимодействии гетерогенных струй с поверхностью теплообмена для тел, частично погруженных в псевдооживленный слой (см. рис. 2), коэффициент $\bar{\alpha}$ слабо зависит от числа псевдооживления, зависимость $\bar{\alpha} = f(W)$ имеет вид пологой кривой, существует оптимальное число псевдооживления, при котором интенсивность теплообмена максимальна (кривая 2). Для той же поверхности, но без обработки гетерогенными струями, кривая $\bar{\alpha} = f(W)$ идет круче и число псевдооживления при котором $\bar{\alpha}$ достигает максимальных значений больше, чем с применением струй (кривая 1).

При обработке поверхности гетерогенными струями (см. рис. 2) отклонение режима псевдооживления W на 15...20 % по сравнению с оптимальным, приведет лишь к незначительным (около 5 %) изменениям коэффициента теплоотдачи. В то время как для поверхностей без взаимодействия выступающих частей гетерогенными струями такое отклонение достигает 20 %.

На рис. 3 приведены экспериментальные результаты значений коэффициента теплоотдачи $\bar{\alpha}$ для тел, плавающих в псевдооживленном слое, от числа псевдооживления W , а также зависимость потребляемой мощности на прокачку охлаждающего агента от числа псевдооживления при данных условиях для корунда $d_{\text{ч}} = 0,51$ мм.

Анализируя данные, представленные на рис. 3, следует отметить, что для увеличения среднего коэффициента теплоотдачи плавающих в псевдооживленном слое тел необходимо увеличить число псевдооживления (расход охлаждающего агента), что в результате роста пульсаций слоя приведет к контактированию большей части поверхности нагрева с дисперсной средой, но и, в свою очередь, возрастут затраты энергии на прокачку теплоносителя (сплошная линия, рис. 3). Наибольшее значение $\bar{\alpha}$ для плавающих тел в псевдооживленном слое в наших опытах достигалось при $W = 2,4 \dots 2,6$, при дальнейшем увеличении W значение $\bar{\alpha}$ практически не изменяется (кривые 1, 3, рис. 3). Затраты энергии на прокачку теплоносителя при $W = 2,6$ составляли около 700 Вт (сплошная линия, рис. 3).

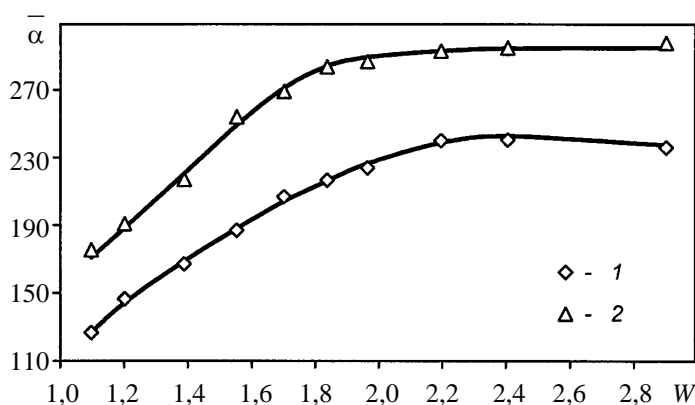


Рис. 2. Влияние гетерогенных струй на интенсивность теплообмена для тел, частично погруженных в псевдооживленный слой при различных W .

Цилиндр с $D = 30$ мм и $L = 40$ мм погружен в псевдооживленный слой на 35 %:
 1 – цилиндр без обработки гетерогенными струями; 2 – цилиндр обрабатывается тремя гетерогенными струями; $d_{\text{тр}} = 4,8$ мм, $d_{\text{н}} = 16$ мм

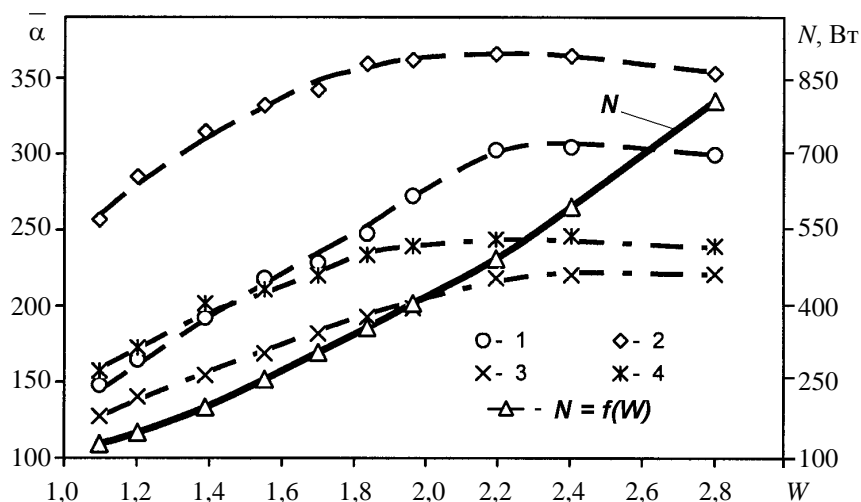


Рис. 3. Зависимость коэффициента теплоотдачи $\bar{\alpha}$ для плавающих в псевдооживленном слое тел и потребляемой мощности N , Вт, на прокачку оживающего агента от числа псевдооживления W :

материал частиц – корунд $d_{ч} = 0,51$ мм; $H_0 = 60$ мм; 1, 3 – без обработки гетерогенными струями; 2, 4 – с обработкой поверхности гетерогенными струями; штриховые линии – цилиндр $D = 40$ мм, $L = 90$ мм; штрихпунктирные – $D = 50$ мм, $L = 70$ мм; сплошная линия – зависимость $N = f(W)$

Визуально было замечено, что в зависимости от размеров тела и степени погружения их в слой при $W > 2,4$ пульсации слоя приводят к тому, что на верхней части цилиндра образовывается шапка неподвижно лежащих или медленно сползающих частиц.

Гетерогенные струи на выходе из сопла направлены на выступающую поверхность теплообмена, что способствует интенсивному взаимодействию дисперсной среды со всей поверхностью и не только более равномерному распределению коэффициентов теплоотдачи в поперечном сечении, но и общему росту $\bar{\alpha}$ и достижению его максимального значения при меньших расходах воздуха – $W = 2,0$ (кривые 2, 4, рис. 3). При этом затраты энергии на создание слоя составили 405 Вт. Таким образом, применение гетерогенных струй привело к снижению энергетических затрат на осуществление процесса внешнего теплообмена в данном эксперименте на 40 %.

При дальнейшем увеличении числа псевдооживления наблюдается уменьшение интенсивности теплообмена и приближение коэффициентов теплоотдачи к значениям коэффициентов для тел, свободно плавающих в слое. Такой характер кривых при использовании гетерогенных струй можно объяснить тем, что при режимах $W > 2$ пульсации псевдооживленного слоя уменьшают влияние струй на коэффициент теплоотдачи.

Регулирование интенсивности внешнего теплообмена, можно осуществлять не только изменением режима работы W , но еще и рядом гибко настраиваемых параметров – глубиной погружения сопла в псевдооживленный слой; высотой насыпного слоя; размерами торца сопла, погруженного в слой $d_{тр}$, $d_{н}$; числом струй и углом их наклона к поверхности.

Заключение

Установлено, что обработка гетерогенными струями выступающих поверхностей тел, частично погруженных в псевдооживленный слой или плавающих на его поверхности приводит к увеличению интенсивности внешнего теплообмена

(в наших опытах на 10...40 %) и к снижению затрат энергии на прокачку теплоносителя (на 30...50 %).

Список литературы

1. Техника и технологии псевдооживления: гидродинамика и теплообмен с погруженными телами / С.И. Дворецкий [и др.]. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2005. – 168 с.

2. Красных, В.Ю. Квазикапиллярные эффекты в псевдооживленных средах / В.Ю. Красных, Е.М. Толмачев, В.Н. Королев // Инженерная физика. – 2007. – № 2.

3. Королев, В.Н. Интенсификация внешнего теплообмена в псевдооживленном слое : монография / В.Н. Королев, А.Ф. Редько, Д.А. Худенко. – Харьков : Изд-во Харьк. воен. ун-та, 2002.

4. Красных, В.Ю. Оптимизация энергетических затрат на образование псевдооживленного слоя при сохранении высокой интенсивности внешнего теплообмена / В.Ю. Красных, В.Н. Королев // Промышленная энергетика. – 2006. – № 12. – С. 30–33.

Intensification of External Heat Transfer of Bodies Partly Plunged into Fluidized Bed with Heterogeneous Streams and Expenditure of Energy Used in the Process

V.Yu. Krasnykh, S.A. Nagornov, V.N. Korolev

Urals State Technical University (1); All-Russian Research and Design Technological Institute of Equipment and Oil Products in Agriculture (2)

Intensifikation des Außen-austausches der in die quasiflüssigen von den heterogenen Ströme teilweise versenkten Körper und energetische Aufwände für die Realisierung des Prozesses

Intensification de l'échange thermique intérieur des corps plongés partiellement dans une couche pseudoliquide par des jets hétérogènes et dépenses énergétiques pour la réalisation du processus
