

ОПТИМИЗАЦИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ЗАТРАТ НА СОЗДАНИЕ ПСЕВДООЖИЖЕННОГО СЛОЯ, ИСПОЛЪЗУЕМОГО В КАЧЕСТВЕ ПРОМЕЖУТОЧНОГО ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ

АННОТАЦИЯ

Оптимизированы энергетические затраты на создание псевдоожигенного слоя при сохранении высокой интенсивности процесса внешнего теплообмена. Для эффективного проведения процесса выявлены оптимальные сопротивления газораспределительных решеток провального типа; оптимальные соотношения габаритных размеров погружаемого в псевдоожигенный слой тела и сечения аппарата, объема тела и объема насыпного слоя.

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время уровень развития науки и техники псевдоожигения требует создания эффективных установок с меньшими энергетическими затратами на осуществление процесса. Одними из средств снижения затрат энергии на прокачку теплоносителя — уменьшение сопротивлений газораспределительных устройств и уменьшение объема насыпного слоя (его веса) при сохранении максимальных значений коэффициентов теплоотдачи.

2. ВЫЯВЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ПЕРФОРИРОВАННЫХ ГАЗОРАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ РЕШЕТОК

2.1. Постановка задачи

Анализируя литературные данные, можно отметить, что единого мнения о минимальной допустимой величине сопротивления решетки и ее влияния на теплообмен погруженного в псевдоожигенный слой тела нет. Одни авторы полагают, что сопротивление решетки должно быть больше или хотя бы равно сопротивлению слоя. Другие же считают, что можно удовлетвориться значительно меньшим сопротивлением решетки [1]. Поэтому нами была поставлена задача — выявить оптимальное сопротивление решетки с точки зрения структуры псевдоожигенного слоя, интенсивности процесса теплоотдачи и затрат мощности на прокачку теплоносителя.

Основными параметрами, характеризующими работу газораспределительных решеток, принято считать гидравлическое сопротивление решетки при рабочей скорости фильтрации или безразмерную величину этого сопротивления по отношению к сопротивлению слоя ($\Delta P_{\text{реш}}/\Delta P_{\text{сл}}$), и живое сечение газораспределительного устройства — отношение суммарной площади отверстий в решетке к сечению слоя (φ , %). Параметр φ по сути дела не зависи-

мый, а производный от первого, так как при заданной рабочей скорости фильтрации чем меньше живое сечение, тем больше скорость газа в отверстиях решетки и выше ее гидравлическое сопротивление. Оценка устройств по живому сечению мало пригодна для точных расчетов, но удобна для ориентировочных оценок.

2.2. Установка и методика проведения исследования

Были проведены опыты со слоями стеклянных шариков (диаметр частиц слоя — $d = 0.675$ мм), частиц корунда $d = 0.130$ мм и 0.510 мм псевдоожигаемых воздухом на перфорированных решетках толщиной 3.5 мм с различными живыми сечениями. Аппарат был квадратного сечения 100×100 мм², высотой 300 мм, высота насыпного слоя во всех опытах была одинаковой — $H_0 = 110$ мм.

Исследовалось 9 перфорированных решеток. Отверстия в решетке на единице площади располагались в вершинах и центре квадрата со стороной 10 мм. Диаметры отверстий решеток: 0.5 ; 1.0 ; 1.5 ; 2.0 ; 2.5 ; 3.0 ; 3.5 ; 4.0 ; 5.0 мм, что соответствовало живому сечению решеток 0.79 ; 1.57 ; 3.53 ; 6.28 ; 9.82 ; 14.14 ; 19.24 ; 25.13 ; 39.27 % соответственно.

В середину слоя, на расстоянии 35 мм от газораспределительной решетки, помещался медный образец диаметром $D = 30$ мм с вмонтированными в него нагревателем и тремя термомпарами. С помощью термомпар измеряли температуру поверхности стенки образца и температуру слоя. Сопротивление решетки и сопротивление слоя измерялись микроманометрами. Коэффициент теплоотдачи определялся по стационарной методике.

2.3. Результаты исследования

На исследованных решетках для различных материалов коэффициент теплоотдачи ($\bar{\alpha}$) достигал максимума при числах псевдоожигения $W = 2.0$; 2.6 ; 2.4 для частиц диаметром $d = 0.675$; 0.130 ; 0.510 мм соответственно.

При использовании решеток с небольшим живым сечением — $\varphi = 0.79\%$; 1.57% и 3.53% (большим гидравлическим сопротивлением) псевдоожигенный слой был относительно однородным, наблюдались проскоки газа в виде небольших пузырей. При увеличении живого сечения решетки до $\varphi = 6,28\%$; $9,82\%$ и $14,14\%$ (уменьшении гидравлического сопротивления) псевдоожигение станови-

лось более неоднородным, с прорывами пузырей увеличенного размера и повышенным выбросом частиц в надслоевое пространство. Дальнейшее увеличение живого сечения решеток до $\varphi = 19,24\%$ и $25,13\%$ приводило к тому, что внутри слоя возникали каналы, через которые протекала значительная доля оживающего агента, при этом остальная часть слоя оставалась малоподвижной. В аппарате с решеткой живым сечением $\varphi = 39,27\%$ псевдооживление носило поршневой характер.

Так как общий вес частиц в эксперименте не изменялся, поэтому относительное сопротивление решеток ($\Delta P_{\text{реш}}/\Delta P_{\text{сл}}$) с различными живыми сечениями зависело только от самого перепада давлений на решетке — $\Delta P_{\text{реш}}$ ($\Delta P_{\text{сл}} = \text{const}$) и возрастало с уменьшением живого сечения.

На рис. 1. показано, при каких значениях относительного сопротивления решеток ($\Delta P_{\text{реш}}/\Delta P_{\text{сл}}$) достигались максимальные значения коэффициентов теплоотдачи.

Минимальные значения ($\Delta P_{\text{реш}}/\Delta P_{\text{сл}}$) на кривых рис. 1 соответствуют живому сечению решетки $\varphi = 39,27\%$, а максимальные — живому сечению $\varphi = 0,79\%$.

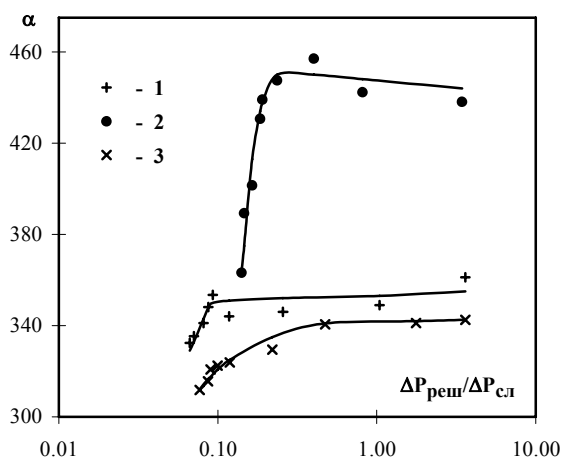


Рис. 1. Величина максимального коэффициента теплоотдачи $\bar{\alpha}$, Вт/(м²·К) в зависимости от $\Delta P_{\text{реш}}/\Delta P_{\text{сл}}$: 1 — стеклянные шарики ($d = 0.675$ мм), $W = 2.0$; 2 — корунд ($d = 0.130$ мм), $W = 2.6$; 3 — корунд ($d = 0.510$ мм), $W = 2.4$

Как следует из полученных экспериментальных данных (рис. 1), для псевдооживленного слоя сферических частиц (стеклянные шарики) коэффициент теплоотдачи уменьшается при $(\Delta P_{\text{реш}}/\Delta P_{\text{сл}}) < 0.09$ ($\varphi > 14.1\%$), а при дальнейшем увеличении ($\Delta P_{\text{реш}}/\Delta P_{\text{сл}}$) (уменьшении живого сечения) остается постоянным. В слоях несферических частиц корунда ($d = 0.510$ мм) коэффициент теплоотдачи уменьшается при $(\Delta P_{\text{реш}}/\Delta P_{\text{сл}}) < 0.22$ ($\varphi > 7.0\%$), при дальнейшем увеличении относительного сопротивления $\bar{\alpha}$ не изменяется. В слоях мелких частиц корунда ($d = 0.130$ мм) коэффициент теплоотдачи уменьшается при $(\Delta P_{\text{реш}}/\Delta P_{\text{сл}}) < 0.19$ ($\varphi > 9.8\%$), а

при более высоких значениях ($\Delta P_{\text{реш}}/\Delta P_{\text{сл}}$) коэффициент теплоотдачи изменяется мало.

Анализ результатов экспериментов показал, что с точки зрения интенсивности теплообмена целесообразно применять газораспределительные перфорированные решетки с живым сечением $\varphi < 7.5\%$.

Эффективность теплоносителя необходимо оценивать не только по достигаемым коэффициентам теплоотдачи, но и затратой энергии на преодоление сопротивления по перемещению теплоносителя. На рис. 2 изображены зависимости потребляемой мощности на прокачку теплоносителя (N) от ($\Delta P_{\text{реш}}/\Delta P_{\text{сл}}$) через те же исследуемые решетки и для тех же материалов.

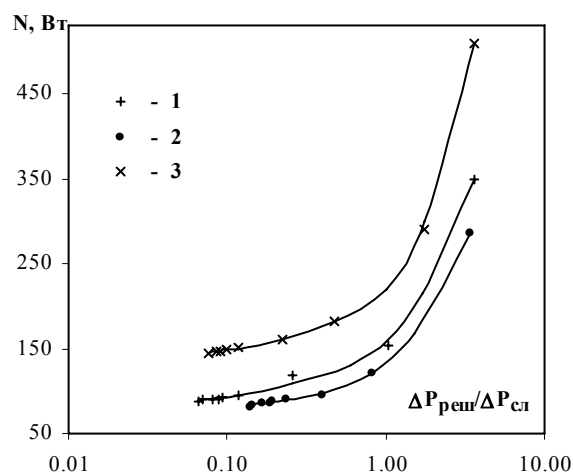


Рис. 2. Зависимости потребляемой мощности на прокачку теплоносителя N от $\Delta P_{\text{реш}}/\Delta P_{\text{сл}}$: 1 — стеклянные шарики ($d = 0.675$ мм), $W = 2.0$; 2 — корунд ($d = 0.130$ мм), $W = 2.6$; 3 — корунд ($d = 0.510$ мм), $W = 2.4$

Из рисунка следует, что с увеличением сопротивления газораспределительной решетки мощность на прокачку теплоносителя для обеспечения максимальной интенсивности процесса теплоотдачи увеличивается.

Нам представляется более правильным сравнивать эффективность псевдооживленных слоев (как промежуточных теплоносителей), получаемых на различных газораспределительных решетках, не только по величинам коэффициентов теплоотдачи при одинаковых числах псевдооживления (W), но и по затратам мощности на прокачку теплоносителя.

Коэффициент эффективности η [2] есть отношение количества теплоты Q , передаваемого от теплоносителя к поверхности теплообмена (или, наоборот) в единицу времени к затраченной мощности N на прокачку данного теплоносителя ($\eta = Q/N$, где $Q = \bar{\alpha} \cdot F_T \cdot \Delta T$; при $F_T = 1$ и $\Delta T = 1$; $\eta = \bar{\alpha}/N$).

На рис. 3 представлены зависимости коэффициента эффективности (η) от относительного сопротивления решеток.

Как следует из рисунка, коэффициент эффективности псевдооживленного слоя для решеток с большим сопротивлением — ($\Delta P_{\text{реш}}/\Delta P_{\text{сл}}) > 0.3$

($\varphi < 6.28\%$) низкий. Для решеток с данным сопротивлением величина коэффициента теплоотдачи несколько выше, по сравнению с решетками с меньшим сопротивлением (рис. 1), а затрачиваемая мощность на прокачку теплоносителя значительно больше (рис. 2).

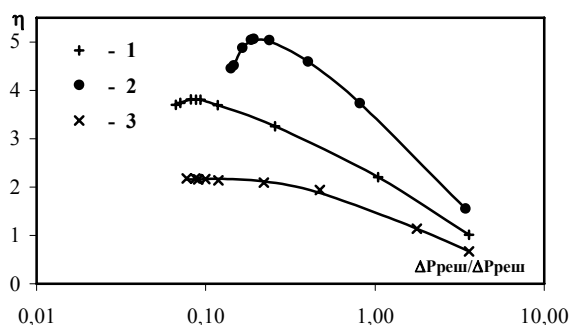


Рис. 3. Зависимости коэффициента эффективности η от $\Delta P_{\text{реш}}/\Delta P_{\text{сл}}$: 1 — стеклянные шарики ($d = 0.675$ мм), $W = 2.0$; 2 — корунд ($d = 0.130$ мм), $W = 2.6$; 3 — корунд ($d = 0.510$ мм) при $W = 2.4$

В слоях для решеток с малым сопротивлением — ($\Delta P_{\text{реш}}/\Delta P_{\text{сл}} < 0.3$ ($\varphi > 25\%$)) коэффициент эффективности высокий. Использование этих решеток уменьшает затраты мощности на прокачку охлаждающего агента, однако интенсивность теплообмена в слоях с такими решетками ниже вследствие значительной неоднородности самого слоя (каналообразование, проскоки больших пузырей и поршней).

Таким образом, эксперименты показали, что с точки зрения интенсивности процесса внешнего теплообмена и затрат мощности на прокачку теплоносителя, оптимальными являются аппараты с провальными решетками, живое сечение которых составляет $\varphi = (9...14)\%$ при относительном сопротивлении решеток ($\Delta P_{\text{реш}}/\Delta P_{\text{сл}} = (0,1...0,2)$).

3. СООТНОШЕНИЕ МЕЖДУ ОБЪЕМАМИ НАСЫПНОГО СЛОЯ И ПОГРУЖАЕМОГО В НЕГО ТЕЛА

3.1. Постановка задачи

В литературе встречаются единичные исследования [3], посвященные соотношениям размеров аппарата и помещенного в псевдооживленный слой тела.

Относительное сопротивление газораспределительной решетки ($\Delta P_{\text{реш}}/\Delta P_{\text{сл}}$) и мощность, затраченная на прокачку теплоносителя, зависят от количества материала, насыпанного в аппарат. Как это следует из определения коэффициента эффективности, псевдооживленный слой малоэффективен, когда поверхность теплообмена много меньше площади поперечного сечения аппарата при прочих равных условиях, т. е. нагрев тонких деталей в псевдооживленном слое большого объема может оказаться экономически нецелесообразным.

3.2. Установка и методика проведения исследования

Нами были проведены эксперименты для выяснения оптимального соотношения размеров аппарата и помещенного в псевдооживленный слой тела, оптимального объема насыпного слоя, с точки зрения эффективности процесса внешнего теплообмена.

В опытах использовалась провальная решетка с оптимальным (с точки зрения эффективности процесса внешнего теплообмена) живым сечением $\varphi = 9.82\%$. Высота насыпного слоя оставалась неизменной — $H_0 = 110$ мм. На высоте 35 мм от газораспределительной решетки закреплялся калориметр, диаметр поперечного сечения которого $D = 30$ мм. Площадь поверхности калориметра и его объем составляли 51.84 см^2 и 21.21 см^3 соответственно. В качестве твердой фазы использовались частицы, указанные выше.

Псевдооживленный слой создавался в 6 аппаратах квадратного сечения (сторона квадрата — B): 100×100 ; 90×90 ; 80×80 ; 70×70 ; 60×60 ; $50 \times 50 \text{ мм}^2$. Таким образом, площадь сечения изменялась от 100 до 25 см^2 , а объем насыпного слоя — от 1100 до 275 см^3 .

3.3. Результаты исследования

На рис. 4 показана зависимость коэффициента теплоотдачи от относительного поперечного размера, погружаемого в слой, тела (B/D).

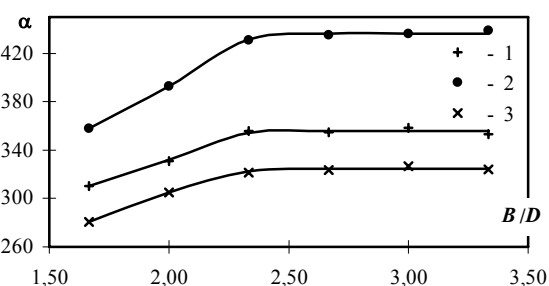


Рис. 4. Зависимости коэффициента теплоотдачи $\bar{\alpha}$, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ от B/D при одинаковой высоте насыпного слоя: 1 — стеклянные шарики ($d = 0.675$ мм), $W = 2.0$; 2 — корунд ($d = 0.130$ мм), $W = 2.6$; 3 — корунд ($d = 0.510$ мм), $W = 2.4$

Как следует из рисунка, при уменьшении массы насыпного слоя, что соответствует уменьшению относительного поперечного размера (B/D) с 3.33 до 2.33 , коэффициент теплоотдачи $\bar{\alpha}$ оставался неизменным, а при дальнейшем уменьшении (B/D) до 1.67 , $\bar{\alpha}$ уменьшается, причем уменьшение коэффициента теплоотдачи значительнее для более мелких частиц ($d = 0.130$ мм). Падение $\bar{\alpha}$ можно объяснить тем, что при постоянной высоте слоя, уменьшение сечения аппарата ведет к уменьшению зазора между телом и стенкой аппарата (загромождается свободное сечение слоя), что приводит к неодинаковому по структуре псевдооживленному слою и возникновению режима псевдооживления, близкому к поршневому.

Для достижения максимальных значений $\bar{\alpha}$ достаточно, чтобы сечение аппарата было примерно 2.3 раза больше максимального поперечного размера тела, а объем слоя в 25 раз больше объема тела.

Уменьшение площади сечения аппарата при одинаковом режиме работы уменьшает расход оживающего агента и соответственно снижает мощность на прокачку теплоносителя (рис. 5).

Коэффициенты эффективности, полученные в ходе эксперимента, представлены на рис. 6.

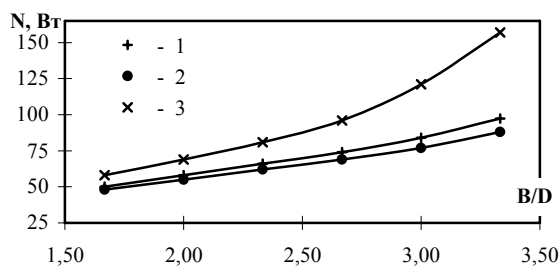


Рис. 5. Зависимости потребляемой мощности на прокачку теплоносителя N от B/D при одинаковой высоте насыпного слоя: 1 — стеклянные шарики ($d = 0.675$ мм), $W = 2.0$; 2 — корунд ($d = 0.130$ мм), $W = 2.6$; 3 — корунд ($d = 0.510$ мм), $W = 2.4$

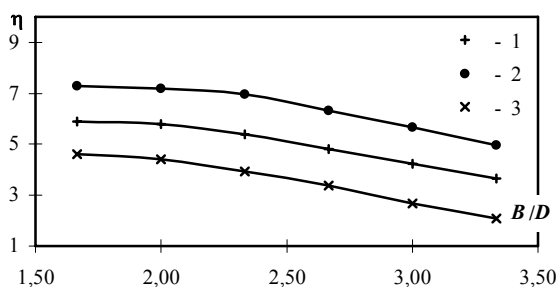


Рис. 6. Зависимости коэффициента эффективности η от B/D при одинаковой высоте насыпного слоя: 1 — стеклянные шарики ($d = 0.675$ мм), $W = 2.0$; 2 — корунд ($d = 0.130$ мм), $W = 2.6$; 3 — корунд ($d = 0.510$ мм), $W = 2.4$.

Полученные данные позволяют сделать вывод, что эффективность процессов внешнего теплообмена для аппаратов псевдооживленного слоя с меньшим сечением (меньшим объемом слоя) оказывается выше, чем для аппаратов с большим сечением слоя. Например, при изменении B/D от 2.33 до 1.67 в наших экспериментах средней коэффициент теплоотдачи уменьшился на 15%, а мощность на прокачку теплоносителя на 53%. Снижение мощности, затрачиваемой на прокачку теплоносителя, оказывается больше, чем снижение $\bar{\alpha}$. Однако применять аппараты с отношением $(B/D) < 2$ не рекомендуется, так как структура возникающего псевдооживленного слоя неоднородна, и псевдооживление носит близкий к поршневому характер.

Учитывая все вышеизложенное, можно сделать вывод, что для эффективного процесса внешнего теплообмена достаточно, чтобы соотношение между линейными размерами (в поперечном сечении) аппарата и погруженного в него тела $(B/D) \approx 2$, а объем насыпного слоя превышал объем тела примерно в 18 раз. Дальнейшее увеличение сечения аппарата слоя лишь увеличивает объем насыпного слоя, затраты на прокачку теплоносителя, а коэффициент теплоотдачи при этом не изменяется.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. С точки зрения интенсивности процесса внешнего теплообмена и затрат мощности на перемещение теплоносителя оптимальными являются аппараты с провальными решетками, живое сечение которых составляет $\varphi = (9 \dots 14)\%$ (относительное сопротивление решеток $(\Delta P_{\text{реш}}/\Delta P_{\text{сл}}) = (0,1 \dots 0,2)$).

2. Для эффективного проведения процесса внешнего теплообмена достаточно, чтобы отношение габаритного поперечного размера аппарата к линейному размеру тела $(B/D) \approx 2$, а объем насыпного слоя примерно в 18 раз превышал объем помещаемого в него тела.

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

- $\Delta P_{\text{реш}}$ — сопротивление решетки, Н/м^2 ;
- $\Delta P_{\text{сл}}$ — сопротивление слоя, Н/м^2 ;
- φ — живое сечение перфорированной газораспределительной решетки, %;
- d — диаметр частиц слоя, мм;
- H_0 — высота насыпного слоя, м;
- D — диаметр образца, размещенного в псевдооживленном слое, м;
- W — число псевдооживления;
- $\bar{\alpha}$ — средний по времени и по поверхности тела коэффициент теплоотдачи, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$;
- N — мощность, потребляемая на прокачку теплоносителя, Вт;
- η — коэффициент эффективности;
- B — сторона (габаритный размер) квадратного сечения аппарата с псевдооживленным слоем, м.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Забродский С.С.** Выходные температуры установки с псевдооживленным слоем (общие вопросы, разработки и закономерности). М.: Энергия, 1971. С. 197.
2. **Королев В.Н.** Об эффективности кипящего слоя как промежуточного теплоносителя // Тепло- и массообмен и неравновесная термодинамика дисперсных систем: Тр. УПИ им. С.М. Кирова. Свердловск: УПИ, 1974. № 227. С. 76—78.
3. **Замбрицкий В.С., Лун-Фу А.В., Нагорнов С.А., Королев В.Н.** Внешний теплообмен псевдооживленной среды в аппарате кольцевого сечения // Дисперсные потоки и пористые среды: Тр. 3-й РНКТ. М.: Издательство МЭИ, 2002. Т. 5. С. 221—223.