

7 54
ОДЕССКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
им. М. В. ЛОМОНОСОВА

Аспирант Ю. Л. ТОНКОНОГИЙ

**Исследование механики, аэродинамики
и теплообмена плотного и неплотного
(падающего) гравитационных
непродуваемых слоев дисперсной
среды**

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель — доктор технических наук
З. Р. Горбис

Переучет 10 84

ОДЕССА
1965

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ УССР

ОДЕССКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
им. М. В. ЛОМОНОСОВА

Аспирант Ю. Л. ТОНКОНОГИЙ

Исследование механики, аэродинамики
и теплообмена плотного и неплотного
(падающего) гравитационных
непродуваемых слоев дисперсной
среды

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель — доктор технических наук
З. Р. Горбис

✓ 000 731



ОДЕССА
1965

ОНАХТ 23.05.12
Исследование механик



v000731

Одесский технологический институт имени М. В. Ломоносова направляет Вам для ознакомления автореферат диссертационной работы аспиранта Ю. Л. Тонконого на тему «Исследование механики, аэродинамики и теплообмена плотного и неплотного (падающего) гравитационных непродуваемых слоев дисперсной среды», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук.

Защита состоится „ 2 “ VI 1965 г.

Ваши отзывы и замечания в 2-х экземплярах просим направлять по адресу: г. Одесса, ул. Свердлова, № 112, Одесский технологический институт.

Работа выполнена в Одесском технологическом институте имени М. В. Ломоносова.

Ученый секретарь Совета (Запорожец Л. А.)

Л. А. Запорожец

1. ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Теплообмен между гравитационным слоем (плотным и неплотным, или падающим) сыпучего материала и поверхностью нагрева используется в различных областях техники: в установках каталитического крекинга нефти с подвижным катализатором, в химической промышленности при недопустимости контакта между сыпучим материалом и греющей (охлаждающей) средой, в цементной промышленности для предварительного подогрева цементного сырья, на электродных заводах, в литейном производстве. Движущийся слой сыпучего материала может быть применен в качестве промежуточного теплоносителя в ряде энергетических установок, например, в реакторах и парогенераторах АЭС, регенераторах газотурбинных установок. Такой промежуточный теплоноситель обеспечивает высокую интенсивность теплообмена и позволяет удешевить энергетические установки и снизить себестоимость производимой энергии.

Для расчета и выбора рациональных схем указанных установок необходимы данные по теплообмену как плотного, так и неплотного слоя. Однако этот вид теплообмена изучен недостаточно. Известны несколько работ, посвященных теплообмену плотного слоя со стенкой при продольном обтекании, — М. С. Бринна, П. И. Николаева, В. А. Борисевича, З. Р. Горбиса и В. А. Календерьян и др. В этих работах в основном рассмотрены вопросы конвективного теплообмена. Поскольку температура слоя при проведении исследований не превышала 300—400°С, полученные зависимости в случаях более высоких температур не могут быть использованы без проверки.

По падающему непродуваемому слою имеется только одна работа П. Н. Платонова. В ней излагаются данные изучения механики движения и некоторые вопросы аэродинамики падающего слоя. П. Н. Платонов обнаружил важнейшие эффекты в падающем слое — движение газовой фазы, разрежение в канале и пр. Исследовались процессы применительно к зернозагрузочным машинам, полученные зависимости справедливы только для устройств, близких по характеристике к исследованной модели.

По конвективному теплообмену со стенкой падающего слоя какие-либо расчетные рекомендации в доступной нам литературе полностью отсутствуют. Совершенно не ясны механизм теплообмена и возможности падающего слоя как теплоносителя. Так, с одной стороны, В. А. Календерьян и З. Р. Горбис отметили падение интенсивности теплообмена в случае перехода плотного слоя в падающий, с другой, З. Р. Горбис в отдельных режимах наблюдал резкое повышение интенсивности теплообмена при подобном переходе.

Важность исследования теплообмена слоя с поверхностью нагрева определила основную задачу настоящей работы: выяснение механизма теплообмена падающего слоя со стенкой (а в связи с этим — изучение особенностей его механики и аэродинамики) и закономерности теплообмена плотного и падающего слоев как в области низких, так и повышенных температур.

В связи с отсутствием в литературе данных о равномерности движения слоя дисперсной среды в параллельных каналах нами были проведены исследования в этом направлении.

II. ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИКИ И АЭРОДИНАМИКИ ПАДАЮЩЕГО (НЕПЛОТНОГО) И ПЛОТНОГО ГРАВИТАЦИОННЫХ НЕПРОДУВАЕМЫХ СЛОЕВ В ОДИНОЧНОМ КАНАЛЕ

При движении в вертикальном канале падающие частицы благодаря фактору аэродинамического торможения оказывают нагнетающее, эжекционное воздействие на заключенный в канале газ, который приобретает скорость одного направления с частицами. Частицы разгоняются под действием силы тяжести от начальной скорости $w_{т.н} \approx 0$ до равновесной, предельной относительной скорости w_b (в случае достаточно длинного канала). Абсолютная скорость частиц относительно стенок канала при этом

$$w_{т.к} = w_b + w_r. \quad (1)$$

Скорость газа w_r имеет примерно постоянное значение по длине канала.

Дифференциальное уравнение движения частиц:

$$m \frac{dw_r}{dh} w_r = mg \pm c_f F_m \rho (w_r - w_r)^2. \quad (2)$$

Знак «+» относится к начальному участку от 0 до h_1 , где скорость w_r меняется от $w_{т.н} \approx 0$ до $w_r = w_r$; знак «—» — к участку от h_1 до h_2 , где w_r становится равным $w_{т.к}$ и не меняет дальше свое значение.

Для участка равномерного движения частиц, от h_2 до конца канала h :

$$mg = c_f F_m \rho (w_{т.к} - w_r)^2 = c_f F_m \rho w_b^2. \quad (3)$$

Решения уравнения (2) имеют вид:

$$h_1 = \frac{1}{2a} \ln \frac{g}{g + a w_r^2} + \frac{w_r}{\sqrt{ag}} \operatorname{arctg} \frac{a w_r}{\sqrt{ag}}, \quad (4)$$

$$h_2 = \frac{1}{2a} \ln \frac{g^2}{[g - a(w_{т.к} - w_r)^2](g + a w_r^2)} + \frac{w_r}{\sqrt{4ag}} \ln \frac{a(w_r - w_{т.к}) - \sqrt{ag}}{a(w_r - w_{т.к}) + \sqrt{ag}} + \frac{w_r}{\sqrt{ag}} \operatorname{arctg} \frac{a w_r}{\sqrt{ag}}. \quad (5)$$

Здесь

$$a = c_f \frac{F_m \rho}{m}.$$

Уравнения (4) и (5) не решаются аналитически относительно w_r . Но, решив уравнение (5) относительно h_2 , можно выяснить, меньше или равна предельной скорости $w_{т. пред} = w_r + w_b$ конечная скорость частиц.

В первом случае значение $w_{т.к}$ получим, решив численно или графически уравнение (5) относительно w_r .

Решая уравнение (4) относительно h , получаем значение высоты h_1 , где $w_r = w_r$.

Использование выражений (4) и (5) для указанных целей должно проводиться с большой осторожностью, ибо уравнение (2) решено при целом ряде допущений, многие из которых требуют для области концентрации падающего слоя экспериментальной проверки. До проведения таковой полученные решения следует рассматривать как ориентировочные.

В реферируемой работе показано, что в канале падающего слоя существует разрежение, убывающее к низу канала, максимальное значение которого поддерживается в районе точки h_1 . Показано также, что имеет место не только поступательное движение газа вниз, но и циркуляция газа в канале, носящая, по всей вероятности, локальный характер и снижающая величину нисходящего газового потока.

На основе анализа энергетического баланса и учета продольного градиента давления газа получено выражение для скорости газа в канале:

$$w_r = \frac{G_r h - \frac{w_{т.к}^2}{2} \cdot \frac{G_r}{g}}{\Delta p \cdot F_k} - 2 \sqrt{\frac{\Delta p}{\xi_k} \cdot \frac{D_k}{h - h_1} \cdot \frac{2}{\rho}} \quad (6)$$

и выражение для максимального разрежения в канале:

$$\Delta p = \left[\frac{G_T h - \frac{G_T}{g} \cdot \frac{w_{T,K}^2}{2}}{\sqrt{\frac{1}{\xi_K} \cdot \frac{D_K}{h-h_1} \cdot \frac{2}{\rho} F_K} + \sqrt{\frac{1}{\xi_6} \cdot \frac{D_{a,6}}{H_6} \cdot \frac{2}{\rho} F_{ж,6}}} \right]^{2/3} \quad (7)$$

Выражения (6) и (7) позволяют проследить влияние на w_T многих величин. Очевидно, что w_T тем больше, чем больше G_T , h и чем меньше F_K . Чем больше сопротивление канала $\left(\xi_K \frac{h-h_1}{D_K} \right)$, тем больше w_T . Правда, увеличивающееся при этом Δp влияет в обратную сторону, но Δp растет медленнее, и w_T все-таки увеличивается. Из (7) следует, что с ростом сопротивления бункера $\left(\xi_6 \frac{H_6}{D_{a,6}} \right)$ будет расти и Δp .

При этом, согласно (6), w_T уменьшается. Как показано выше, конечная скорость частиц складывается из скорости газа и скорости витания. Поэтому основные параметры системы влияют на w_T так же, как и на w_T и w_B .

Проведенный анализ носит несколько упрощенный характер. Так, коэффициенты гидравлического сопротивления ξ_K и ξ_6 весьма существенно влияют на скорость газа w_T , но сами являются функцией w_T .

Все сказанное справедливо для изотермического потока. В случае неадиабатического течения ρ и ξ_K , сложным образом влияющие на w_T , становятся еще и функцией температуры. Картина усложняется еще больше. С целью проверки полученных результатов и нахождения экспериментальных зависимостей для некоторых важных характеристик падающего слоя был создан специальный патрубковый подвешивался канал, состоящий из переменного числа участков (последнее менялось в пределах 2—7, что при длине участка 0,85 м соответствовало высоте канала от 1,7 до 6 м). Диаметр канала менялся от 15 до 35,5 мм. В качестве исследуемых материалов использовались алюмосиликат, кварцевый песок, искусственный графит. Средний размер этих материалов, подсчитанный по формуле:

$$d_T = \frac{1}{\sum \frac{g_i}{d_i}}, \quad (8)$$

изменялся в пределах 0,03 ÷ 4 мм.

На каждом участке установлены датчики статического движения, позволяющие замерять изменение давления в ка-

нале через каждые 0,85 м. Один участок отделен от другого пробковым краном. Все пробковые краны соединены общей жесткой тягой, позволяющей в случае надобности одновременно открывать и закрывать их. Это давало возможность определить количество твердого материала, одновременно находящегося в участке, и, следовательно, истинную концентрацию $\beta_{уч}$. К низу канала крепился сменный выпускной насадок, позволявший за счет изменения диаметра осуществлять движение твердой фазы плотным либо неплотным слоем и регулировать расход плотного и в некоторых случаях неплотного слоя. Расход слоя G_T определялся весовым способом как количество материала, собранного в специальный мерный ящик, отнесенное ко времени замера.

Расход газа замерялся при помощи специального устройства, представляющего из себя герметическую емкость с двумя патрубками. Один из них при помощи резинового манжета, обеспечивающего герметичность, соединен с каналом. Через этот патрубок в емкость попадали частицы и газ, причем частицы оседали на дне, а газ выходил через второй патрубок, и его расход Q_T замерялся реометром либо (в случае большого расхода — 50 ÷ 300 л/мин) чашечным анемометром. При этом учитывался объем газа, вытесненного из емкости частицами.

Все замеры снимались при установившемся режиме, замеры расхода слоя и газа осуществлялись попеременно при неизменной характеристике системы. Замеренные величины позволили рассчитать скорости частиц w_T и газа w_T и расходную объемную концентрацию $\beta_{об} = \frac{G_T}{\gamma_T Q_T}$.

Проведенные эксперименты подтвердили основные модельные представления и позволили выявить некоторые новые качественные и количественные зависимости. Весьма интересно было бы количественно подтвердить теоретические зависимости (6) и (7) экспериментальными данными, но дело в том, что в указанные зависимости входит целый ряд параметров и коэффициентов, относительно которых в литературе либо отсутствуют надежные данные, либо вообще нет никаких сведений (например, данные о гидравлическом сопротивлении потока типа «падающий слой» при концентрациях твердой фазы $\beta = 0,03 \div 0,3$; о гидравлическом сопротивлении движущейся засыпки в бункере и пр.). Поэтому мы вынуждены были ограничиться качественным подтверждением этих теоретических зависимостей и получить на основании опытных данных зависимости, например, для гидравлического сопротивления потока.

Анализ опытных данных для скорости частиц и газа дает возможность сделать следующие выводы:

1. Характер изменения скорости газа и частиц соответствует предположенному.

2. Чем больше при прочих равных условиях высота канала, тем больше скорость газа и частиц.

3. При установившемся движении частиц ($h > h_2$) разность скоростей частиц и газа постоянна по длине канала и соответствует, по-видимому, предельной относительной скорости движения частиц и газа — скорости витания в стесненных условиях.

4. В случае частиц меньшего размера скорость газа при прочих равных условиях выше, чем для более крупных частиц. По всей вероятности, это связано с уменьшением гидравлического сопротивления канала ξ_k при увеличении размера частиц, что приводит, как показано выше, к уменьшению расхода газа.

Для алюмосиликата ($d_T = 4$ мм) скорость газа оказалась неизмеримо малой. Правда, такой результат получается не только вследствие уменьшения гидравлического сопротивления канала, но и потому, что расход столь крупных частиц и их объемная концентрация значительно меньше, нежели для частиц существенно меньшего диаметра.

5. Относительно влияния сопротивления бункера следует сказать, что всегда, когда запас материала в бункере кончался и высота слоя материала в бункере резко падала, т. е. падало сопротивление бункера, реометр отмечал увеличение расхода газа.

Анализ изменения давления газа в различных каналах позволил сказать следующее:

1) характер изменения давления вдоль канала соответствует полученному из теоретических соображений при анализе предложенной модели процесса;

2) максимальное разрежение в системе поддерживается несколько ниже начала канала. В этой окрестности кривая изменения давления наиболее полого;

3) в случае, когда на выходе из канала отсутствует местное гидравлическое сопротивление — измерительная шайба, давление вдоль всего канала отрицательное. Когда же такое сопротивление есть, в нижней части канала появляется область положительного (избыточного по сравнению с атмосферным) давления;

4) для канала одного диаметра и частиц одного размера Δp увеличивается с увеличением высоты, как это и следует из выражения (7);

5) большие максимальные разрежения отмечаются для частиц меньшего размера. Для таких частиц ξ_k и ξ_6 больше, чем для крупных частиц, и, в соответствии с (7), Δp увеличивается.

Проведенное наблюдение за характером движения падающего слоя выявило отсутствие продольных пульсаций, характерных для обычных двухфазных потоков типа газозвесь и связанных с неравномерностью работы питательных устройств твердой фазы и вентиляторов. Режим пробкового, поршневого движения при незначительных скоростях газа ($w_T = 0,25 \div 0,3$ м/сек), наступающий иногда при высоких концентрациях обычных флюидных потоков, не наступал в случае падающего слоя в изученном диапазоне $\beta = 0,03 \div 0,3$. Во всем этом диапазоне концентраций характер движения слоя принципиально не менялся, и высказанные предположения о характере движения частиц и газа подтвердились для всех значений β .

Проведенные опыты позволили выявить влияние основных факторов на объемную концентрацию и получить обобщенную расчетную зависимость для β . Показано, что

$$\beta = \beta \left(\frac{G_T}{G_{ном}}, \frac{h}{D_k}, \frac{D_k}{d_T} \right). \quad (9)$$

Здесь $G_{ном}$ — номинальный расход плотного слоя при истечении через отверстие диаметром, равным диаметру канала, подсчитывается по известной формуле Рауша.

Обработка опытных данных дала при вероятной погрешности $\pm 9\%$:

$$\beta = 0,6 \left(\frac{G}{G_{ном}} \right)^{0,49} \left(\frac{h}{D_k} \right)^{-0,4}. \quad (10)$$

Зависимость проверена для $0,065 < \frac{G_T}{G_{ном}} < 5$; $48 < \frac{h}{D_k} < 316$;
 $20 < \frac{D_k}{d_T} < 1185$.

Для объемной расходной концентрации $\mu_{об}$ получена следующая эмпирическая зависимость:

$$\mu_{об} = 3,05 h^{-1,85}. \quad (11)$$

Зависимость проверена для $1,7 \text{ м} < h < 6 \text{ м}$; $15 \text{ мм} < D_k < 35 \text{ мм}$; $25 < \frac{D_k}{d_T} < 1185$.

Надо отметить, что формула (11) имеет ограниченное применение. По данным П. Н. Платонова, $\mu_{об}$ зависит еще в значительной степени от расхода слоя (если последний регулируется сверху). Зависимость (11) получена при максимальном для данного канала расходе слоя.

Как отмечено выше, опытная проверка выражения (6) была затруднена из-за отсутствия зависимостей для некоторых

параметров двухфазного потока в области концентраций падающего слоя. Поэтому предпринята обратная попытка рассчитать коэффициент гидравлического сопротивления запыленного потока ξ_k на основании выражения (6). Все остальные величины, входящие в это уравнение, определялись экспериментальным путем. Подсчитанное таким образом значение относилось к усредненной скорости циркуляции w'_r , определяемой как

$$w'_r = \sqrt{\frac{\Delta p}{\xi_k} \cdot \frac{D_k}{h-h_1} \cdot \frac{2}{\rho}}. \quad (12)$$

Обработка опытных данных дала зависимость

$$\xi_k = \frac{10^{10}}{Re^{2,85}}. \quad (13)$$

Зависимость справедлива для $5 \cdot 10^3 < Re = \frac{w'_r D_k}{\nu} < 16 \cdot 10^3$; $0,08 < \beta < 0,12$; $d_r = 0,371 - 0,59$ мм.

Как видно, β менялось в узких пределах, что не позволило выявить несомненно имеющее место влияние концентрации на сопротивление двухфазного потока.

Полученные результаты интересны как первые данные по гидравлическому сопротивлению флюидных потоков типа «падающий слой». Данный вопрос требует дальнейшего изучения, в частности необходима постановка прямых экспериментов.

Наши опыты подтвердили известное положение о возможности гидродинамического управления расходом слоя. Исследовано влияние расхода газа на расход слоя в случаях, когда расход газа менялся по разным причинам: в связи с изменением высоты канала и в связи с изменением диаметра выпускного отверстия в канале падающего слоя. В последнем случае суженное выпускное отверстие является дополнительным гидравлическим сопротивлением для потока, снижающим расход газа. Уменьшившийся расход газа вызывает, в свою очередь, изменение расхода слоя. Результаты этого опыта выдвигают идею регулирования слоя не только сверху, но и снизу.

Замечательно еще одно свойство неплотного слоя — резкое увеличение расхода в сравнении с плотным слоем. Это явление связано с эжекционным эффектом и наличием попутного тока воздуха. Полученные результаты совпадают с наблюдениями Ф. Е. Кенемана.

Рассмотренные свойства неплотного слоя создают возможность использования его в качестве устройства для перекачки газа в специфических условиях, когда, например, надо откачать откуда-либо газ и при этом его охладить. Со-

противление бункера заменяется полезным сопротивлением технологических трактов. К. п. д. такого устройства, выраженный как отношение мощности, затраченной на прокачку газа — $Q_r \Delta p$, к располагаемой мощности $G_r h$, доходил в наших опытах до 20% и, очевидно, может быть существенно повышен при увеличении длины канала.

Нами выяснялись условия перехода падающего слоя в плотный и наоборот. По существующим взглядам, при увеличении диаметра выпускного отверстия сверх определенной величины происходит разрыв плотного слоя и, наоборот, если уменьшать диаметр, то при достижении такой же его величины падающий слой переходит в плотный.

Наши исследования позволили установить, что в действительности таким переходным рубежом является не фиксированное значение $D_{вып}$, а некоторая область его, внутри которой возможно существование как плотного, так и неплотного слоя. Определяющим условием в этом случае является начальное состояние системы. Если канал предварительно заполнен, то при движении частицы к моменту достижения выпускного отверстия имеют небольшую скорость, пропускная способность отверстия меньше подачи материала из бункера и движение осуществляется плотным слоем. Если же канал перед началом движения опорожнен, то частицы, падая с высоты h , проходят выпускное отверстие с большой скоростью, пропускная способность отверстия резко увеличивается и движение осуществляется неплотным слоем.

Опытные данные показывают, что процесс при увеличении и уменьшении диаметра выпускного отверстия протекает неодинаково, наблюдается петля гистерезиса, свойственная и многим другим физическим процессам. При этом следует говорить не просто о критическом числе Фруда $Fr_{кр} = \frac{g D_k}{w_{т.пр}^2}$

(или области этого числа), определенном З. Р. Горбисом, но о первом и втором критических числах Фруда (или области этих чисел). Первое критическое число Фруда характеризует предельное состояние плотного слоя и определяется по предельной скорости плотного слоя:

$$Fr_{кр.1} = \frac{g D_k}{(w_{т.пл}^{пред})^2}. \quad (14)$$

При уменьшении числа Fr сверх $Fr_{кр.1}$ наступает переход плотного слоя в падающий.

Второе критическое число Фруда характеризует предельное состояние неплотного слоя и определяется по предельной скорости неплотного слоя:

$$Fr_{кр.2} = \frac{g D_k}{(w_{т.непл}^{пред})^2}. \quad (15)$$

При увеличении числа $Fr_{сверх}$ $Fr_{ср.2}$ наступает переход падающего слоя в плотный.

Полученное нами значение $Fr_{кр.1}=4\div5$ совпадает с данными З. Р. Горбиса и В. А. Календерьян. Для второго критического числа Фруда получено значение $Fr_{кр.2}\approx 0,04$.

Проведенное изучение элементов аэродинамики движущегося плотного слоя показало, что давление газовой фазы в нем несколько отличается от давления окружающей среды и пульсирует в такт пульсациям самого слоя, отмеченным П. Н. Платоновым. В отличие от неплотного слоя, в плотном давление вверху канала больше, нежели внизу.

На специальной установке исследовалось относительное смещение твердой и газовой фаз. В довольно широком диапазоне изменения скорости слоя и размера частиц смещение фаз отсутствует, что можно объяснить действием сил вязкостного трения.

III. ИССЛЕДОВАНИЕ РАВНОМЕРНОСТИ ДВИЖЕНИЯ СЛОЯ ДИСПЕРСНОЙ СРЕДЫ В ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ КАНАЛАХ

В качестве исследуемого материала использовался бой искусственного графита (фракционированный и смесь средним размером $d_t=1,2$ мм). Истечение через многодырчатое днище раздаточного бункера изучалось с помощью цилиндрического сосуда диаметром 400 мм, емкостью 0,75 м³ путем замера весового расхода через ряды отверстий сменного днища в про-

дольном и поперечном направлениях. $\frac{D_0}{D_T}$ менялось в пределах 5÷58, а относительный шаг отверстий $\frac{S_1}{D_0}=\frac{S_2}{D_0}=1,38\div4$.

Согласно полученным данным, отклонение расхода через данный ряд отверстий G_i от среднего расхода для всех рядов G невелико ($\approx 10\%$). Это характеризует истечение сыпучей среды через многодырчатое днище в изученном диапазоне изменения геометрических факторов как практически равномерный процесс при условии постоянства размеров, формы выпускных отверстий и рабочей высоты бункера, превышающей критическую высоту слоя. Последняя соответствует высоте динамического свода, определяющего расход через отверстие.

Данные по свободному истечению дисперсной среды через параллельно подключенные к раздаточному бункеру вертикальные незашайбованные трубки получены при изучении системы, состоящей из восьми однорядно расположенных каналов ($D_k=14$ мм, $h=2,2$ мм, $S=50$ мм).

В рассматриваемой системе имеет место движение в режиме падающего слоя. При этом расход определяется сечением каналов и условиями их питания раздаточным бункером. Согласно приведенным данным, бункер обеспечивает равномерное распределение. Тогда при одинаковых геометрических характеристиках каналов расход через каждую трубку будет практически одинаковым. Наши опытные данные подтверждают с точностью до 10% это положение.

Равномерность движения плотного слоя в сборках при индивидуальном шайбовании трубок изучалась на специально созданной экспериментальной установке. Четыре канала кольцевого сечения (100×33 мм), параллельно включенные в верхний и нижний бункеры, переводились на режим индивидуального шайбования при помощи шиберов с рядом калиброванных отверстий ($D_{отв}=10, 20, 30$ мм). При одинаковом подпоре (шайбовании) движущегося слоя его расход во всех каналах будет идентичным, если влияние входных условий (например, расположение трубок в верхнем бункере, расстояние каналов от стенки бункера) окажется несущественным. Для проверки этого положения были опробованы шесть различных вариантов сборок, при которых нарушалась симметричность расположения каналов, а относительное расстояние трубок от стенки верхнего бункера менялось в пределах от 1 до 3,5.

Опытные результаты говорят о независимости расхода от условий входа. Определяющими условиями равномерности движения плотного слоя являются выходные условия, создаваемые шайбованием каждого канала. Так как в данном случае обеспечивались строго идентичные условия выхода, то это привело к одинаковой скорости движения в каналах. Указанное положение сохранялось независимо от абсолютного значения весового расхода, который изменялся от 0,01 до 0,145 кг/сек.

Однако подобный метод надежного и устойчивого регулирования равномерного движения дисперсной среды в многоканальных сборках, по-видимому, нерационален при значительном числе каналов. Поэтому больший практический интерес представляют системы с групповым регулированием расхода.

Равномерность движения оценивалась по отклонению средней скорости в данном канале $\bar{w}_{ti}$ от средней скорости движения во всей сборке трубок $\bar{w}_T$. При этом расход среды через каждую трубку G_i определялся пропорционально скорости фиксированных частиц $w_{ст,i}$, движущихся в пристенном, визуально наблюдаемом слое:

$$\bar{w}_{ti} = \frac{G_i}{\gamma_{об} \cdot F}; \quad \bar{w}_T = \frac{G_{обм}}{\gamma_{об} \cdot n \cdot F}; \quad (16)$$

$$G_i = \frac{w_{ст.i}}{\sum_{i=1}^n w_{ст.i}} G_{общ}; \quad w_{ст.i} = \frac{l_{ст.i}}{\tau_{ст.i}}; \quad \frac{\bar{w}_{тi}}{\bar{w}_т} = \frac{n w_{ст.i}}{\sum_{i=1}^n w_{ст.i}}. \quad (17)$$

Выражение (17) можно использовать лишь в том случае, если для каждого канала во всем диапазоне изменения скорости движения слоя скорость фиксированной частицы будет однозначно определяться средней скоростью слоя в данном канале, т. е.

$$\frac{\bar{w}_{тi}}{w_{ст.i}} = \varphi(\bar{w}_{тi}) = \text{const}. \quad (18)$$

Сторонники теории стержнеподобного движения слоя дисперсной среды полагают его движение безградиентным, т. е.

$w_{ст.i} = w_{тi}$ и $\frac{w_{тi}}{w_{ст.i}} = 1$. Однако, согласно имеющимся опытным данным, поле скоростей градиентно: $\bar{w}_{тi} > w_{ст.i}$. Для проверки выражения (18) в опытах с индивидуально зашайбованными каналами величины $w_{тi}$ и $w_{ст.i}$ определялись независимым методом.

Данные многократно проведенных опытов показывают, что искомое отношение не зависит от абсолютного значения скорости и определяется шероховатостью стенок канала и свойствами сыпучего тела. Для исследованных каналов, выполненных из оцинкованной жести, и для смеси графитовых частиц отношение скоростей постоянно, больше единицы и равно $\approx 1,3$. Следовательно, принятая методика оценки неравномерности движения, основанная на сопоставлении скоростей фиксированных частиц, была достоверной и могла быть использована.

На экспериментальной установке были изучены различные сборки с нижним бункером общего регулируемого подпора.

Проведенные опыты и анализ полученных данных позволили установить, что равномерность движения плотного слоя в параллельно включенных в верхний и нижний бункеры каналах может быть обеспечена лишь при выполнении следующих двух основных условий:

- 1) равномерность движения слоя дисперсной среды в выпускном групповом бункере и
- 2) равномерное пространственно симметричное подключение системы каналов, питающих групповой бункер.

Для обеспечения первого условия высота бункера с центральным регулирующим выпускным отверстием должна удовлетворять неравенству

$$H_6 > c \cdot \lg \varphi_{пп}. \quad (19)$$

В связи с указанным в установке был использован бункер высотой 2 м при сечении $0,6 \times 0,6$ м ($\frac{H_6}{c} = 2,35$).

Для резкого уменьшения габаритов бункера и увеличения надежности движения в системе при сохранении равномерности выпуска слоя был успешно применен специально разработанный выпускной механизм с шурующей планкой. Однако указанные мероприятия полностью не обеспечивают требуемой равномерности движения в каналах. Втекающая в нижний бункер сыпучая среда в отличие от жидкостей не занимает весь свободный объем в бункере, а распределяется под углом скольжения (углом естественного откоса в движении), своеобразно сочетая расходы из параллельно питающих каналов с расходом слоя из бункера. Для обеспечения идентичных условий движения в каналах с групповым регулированием необходимо, помимо равномерного по сечению выпуска, осуществить второе условие — равномерную по сечению подачу потоков сыпучей среды. Последнее означает, что каналы необходимо расположить с примерно равными продольными и поперечными шагами.

При наличии достаточно высокого бункера общего подпора ($\frac{H_6}{c} = 2,35$) соблюдалось первое из перечисленных условий, но в восьми из одиннадцати вариантах компоновок цилиндрических и кольцевых каналов нарушалось второе условие — трубы были расположены неравномерно по сечению и с неравными шагами. Это приводило к различию расходов сыпучей среды в 1,5—2 раза.

Второе условие нарушается также в случае, когда при равномерном расположении трубок одна из них заглушается и выходит из строя. Тогда возникает перераспределение неизменившегося общего расхода (зависящего лишь от размера центрального выпускного отверстия) между оставшимися каналами, сопровождаемое существенной неравномерностью.

Неравномерность, возникающая из-за несоблюдения одного из условий и выраженная как отношение $\frac{\bar{w}_{тi}}{\bar{w}_т}$, уменьшается и стремится к единице при увеличении общего расхода до определенного значения, соответствующего предельной скорости плотного слоя (определяемой числом $Fr_{кр.1}$).

Предельная скорость соответствует такому расходу выпускного устройства нижнего бункера, который равен наибольшей производительности всех параллельно включенных каналов. При этом независимо от порядка расположения каналов движение в трубах будет равномерное, так как при разрыве наступает режим несвязанного движения, для ко-

того, согласно ранее приведенным данным, движение в многоканальной системе равномерно.

На равномерность движения также влияет расстояние ближайшего канала от стенки бункера l . Это расстояние, как бы характеризующее свободное от подключенных труб пространство группового бункера, должно быть соизмеримо с шагом сборки каналов. В противном случае неравномерность движения будет тем больше, чем $l > S$. При весьма значительных величинах $l \left(\frac{l}{S} \gg 1 \right)$ движение становится неустойчивым, пульсационным с чередованием режимов плотного и падающего слоев.

IV. ТЕПЛООБМЕН ПЛОТНОГО И НЕПЛОТНОГО СЛОЕВ С ПОВЕРХНОСТЬЮ ВЕРТИКАЛЬНОГО КАНАЛА

Выше показано, что падающий слой представляет из себя нисходящую прямоточную газовзвесь или флюидную взвесь при объемных концентрациях твердой фазы, достигающих до 0,3. Следовательно, для падающего слоя можно ожидать большой величины коэффициентов теплообмена.

Теплообмен со стенкой при охлаждении плотного и неплотного слоев смеси графитовых частиц $d_t = 0,17$ мм в трубчатом канале ($D_k = 16$ мм, $h = 2$ м) в диапазоне температур до 900°C исследовался на специальной установке, состоящей из двух основных частей: бункера-нагревателя и теплообменника. Графит нагревался прямым способом в бункере емкостью $\approx 0,175$ м³, футерованном изнутри шамотным кирпичом и теплоизолированным асбеститом. В торцы бункера заделаны пластины-электроды из нержавеющей стали, к которым подведено напряжение от сварочного трансформатора. Для компенсации теплотерь в окружающую среду на боковых стенках бункера намотаны нихромовые подогреватели. За 10 часов графит нагревался до $\approx 800^\circ\text{C}$. Для рационального проектирования нагревателя предварительно были определены электрические характеристики слоя графитовых частиц.

Определение коэффициентов теплоотдачи α производилось методом стационарного теплового режима (таковой устанавливался обычно через 2—3 минуты после начала движения через канал нагретого графита). Нагретый до нужной температуры графит при прохождении через теплообменник отдавал свое тепло воде, движущейся противоточно последовательно через 4 секции. Раздельное определение теплового потока на каждом участке позволило проследить изменение α по длине канала. Концентрация твердой фазы, расход слоя, давление газа в начале и конце канала определялись так же,

как на стенде для изучения механики и аэродинамики слоя. Кроме того, замерялась тремя термопарами температура графита перед теплообменником и после него — также тремя термопарами. Во втором случае из-за большого градиента температуры по сечению на выходе рабочего участка средняя температура слоя таким способом могла быть определена весьма приблизительно. Для расчета температура слоя после каждого участка определялась из уравнения теплового баланса. Температура стенки каждого из 4-х участков замерялась тремя термопарами. Температура воды на входе и выходе каждого участка замерялась гипертермопарой (две последовательно включенные термопары). Все температуры фиксировались быстродействующими автоматическими электронными потенциометрами. Расход воды G_v замерялся объемным способом при помощи мерного бака. Коэффициент теплоотдачи на каждом участке рассчитывался по формуле:

$$\alpha_{yч} = \frac{G_v(t''_{в.уч} - t'_{в.уч})}{F_{yч} \left(\frac{t'_{сл.уч} + t''_{сл.уч}}{2} - t_{ст.уч} \right)} \quad (20)$$

Исследование теплообмена плотного слоя проводилось при скорости последнего $2 \div 15$ см/сек. Подтверждены известные положения об интенсифицирующем влиянии скорости на процесс теплообмена при $Fr > Fr_{кр.1}$ и о снижении коэффициента теплоотдачи по длине канала (в наших опытах тепловая стабилизация не наступала во всем исследованном диапазоне $\frac{l}{D_k} = 31 \div 125$).

Особый интерес представляло выяснение влияния температурного фактора на теплообмен. В области повышенных температур (у нас до 900°C) радиационная составляющая эффективной теплопроводности может играть в некоторых случаях существенную роль. Эксперименты показали, что при наших условиях увеличение температуры весьма незначительно интенсифицирует теплообмен слоя со стенкой. Этот факт объясняется сильным экранирующим действием частиц ввиду их малого размера. Это положение совпадает с выводами В. А. Борисевича.

Обобщение опытных данных проводилось на основе критериального уравнения, полученного З. Р. Горбисом:

$$Nu = \frac{\alpha D_k}{\lambda_r} = f \left(Pe, Fr, \frac{D_k}{d_t}, \frac{L_k}{D_k}, \frac{\lambda_{сл}}{\lambda_r}, \frac{t_{сл}}{t_r} \right) \quad (21)$$

Обработка опытных данных показала, что выбор в качестве определяющей температуры $t_m = \frac{t_{сл} + t_{ст}}{2}$ учитывает

влияние температурного фактора. Ввиду того, что $\frac{D_k}{d_T} = 94 \gg 30$, по З. Р. Горбису, процесс автомоделен относительно $\frac{D_k}{d_T}$. Критерии Nu и Pr определены по физпараметрам

газовой прослойки (воздуха). Что касается симплекса $\frac{\lambda_{сд}}{\lambda_r}$, то теплопроводность слоя по В. З. Богомолу есть функция только теплопроводности газовой прослойки и порозности слоя. Порозность же плотного слоя примерно постоянна.

Опытные данные аппроксимируются с вероятной погрешностью $\pm 8\%$ зависимостью:

$$Nu_m = 122 \left(Pe_m \frac{D_k}{L} \right)^{0,4} \quad (22)$$

или, обозначая $Pe_m \frac{D_k}{L} = Fo_m^{-1}$,

где Fo — критерий Фурье:

$$Nu_m = 122 Fo_m^{-0,4}. \quad (23)$$

Выражение (23) проверено при $0,8 < Fo < 20$, $\frac{D_k}{d_T} > 30$, $150^\circ \text{C} < t_{сд} < 850^\circ \text{C}$.

Зависимость (22) совпадает в пределах нескольких процентов с зависимостью для теплообмена плотного слоя, полученной З. Р. Горбисом:

$$Nu = \frac{\alpha_{сд} D_k}{\lambda_r} = 0,0121 \left(Pe \frac{D_k}{L} \right)^{0,4} \left(\frac{\lambda_{сд}}{\lambda_r} \right)^3, \quad (24)$$

если $\frac{\lambda_{сд}}{\lambda_r}$ рассчитать по формуле В. З. Богомолова.

Исследование теплообмена падающего слоя со стенкой проводилось в диапазоне изменения расхода $0,005 \div 0,2 \text{ кг/сек}$, что соответствовало диапазону концентраций $\beta = 0,025 \div 0,3$. Начальная температура слоя изменялась в пределах $150 \div 850^\circ \text{C}$. Высота и диаметр канала в опытах оставались неизменными. Были достигнуты довольно высокие значения α — порядка $300 \div 400 \text{ ккал/м}^2 \text{ час } ^\circ \text{C}$. Опыты показали ведущую роль увеличения концентрации β в интенсификации теплообмена. В изученном диапазоне концентраций не обнаружено оптимального значения концентраций плотного слоя, после которого интенсивность теплообмена снижается. Это говорит о том, что структура падающего слоя во многом не соответ-

ствует модели флюидных потоков, предложенной З. Р. Горбисом. Падающий слой есть 2-фазный поток с естественным движением газа и большими объемными концентрациями здесь соответствуют еще и большие расходы газа.

Эксперименты показали, что в диапазоне температур $150 \div 850^\circ \text{C}$ радиационная составляющая в общем теплообмене весьма невелика. Это объясняется экранирующим действием частиц и малой эффективной длиной луча. Лишь в области малых концентраций ($\beta = 0,03 \div 0,05$) наблюдается расслоение точек — для более высоких температур α несколько выше при одинаковой концентрации. Это связано с увеличением расстояния между частицами, уменьшением их экранирующего действия. Но в этой области и суммарное значение α , и, разумеется, лучистая составляющая имеют невысокое абсолютное значение. Увеличение концентрации увеличивает конвективный теплообмен и уменьшает лучистый.

Исследование изменения теплообмена падающего слоя по длине канала показало, что оно резко отличается от наблюдаемого для плотного слоя. Сначала α несколько растет, что связано с разгоном частиц, далее движение стабилизируется, и рост теплообмена прекращается. В конце канала α либо остается неизменным, либо незначительно снижается в связи с тепловой стабилизацией или снижением температуры слоя к концу канала.

В отличие от плотного слоя, где увеличение высоты канала не сказывается ни на движении, ни на теплообмене слоя в верхней части канала, движение и, следовательно, теплообмен падающего слоя существенно зависят от высоты. К сожалению, ограниченность задач исследования не позволила прямым образом выяснить влияние высоты на теплообмен, и об этом приходится делать лишь косвенное заключение.

Для теплообмена падающего слоя получено 2 вида корреляций. В качестве определяющей температуры выбрана $t_m = \frac{t_{сд} + t_{ст}}{2}$. В первом случае искалась зависимость критерия Nu от концентрации β в виде:

$$Nu_m = A \beta^n. \quad (25)$$

Здесь A учитывает влияние таких факторов, как h_k , D_k , d_T и пр. Поскольку в наших опытах все они оставались неизменными, величина A в данном случае является постоянной.

При $0,03 < \beta < 0,3$, $8 < \frac{t_{сд}}{t_{ст}} < 16$, $\frac{L_k}{D_k} = 125$, $Bi < 0,1$, $\frac{D_k}{d_T} > 30$ с вероятной погрешностью $\pm 7\%$ получено

$$Nu = 1109 \beta^{1,22} = 665 \left(\frac{G_T}{G_{ном}} \right)^{0,6} \left(\frac{h}{D_k} \right)^{-0,49}. \quad (26)$$

Эта корреляция имеет простой вид и удобна для расчетов, но, к сожалению, применима лишь в случае соблюдения условий эксперимента.

При втором варианте обработки искалась зависимость для относительного увеличения теплоотдачи слоя (в сравнении с чисто газовым потоком) в виде:

$$\frac{Nu_{сл}}{Nu} = 1 + \kappa \frac{c_{г\gamma_t}}{c_{г\gamma_r}} \beta^m. \quad (27)$$

Подобная обработка обычно проводится при исследовании теплообмена потоков газозвеси и позволяет в значительной степени учесть влияние высоты канала [т. к. $Nu_r = f(w_r) = \varphi(h_r)$]. Параметры газового потока определялись в соответствии с зависимостью (11). Nu_r определялся по известной формуле Михеева.

С точностью $\pm 12\%$ получено:

$$\begin{aligned} \text{при } 0,03 < \beta < 0,1 & \quad \kappa = 0,178; \quad m = 1,4; \\ \text{при } 0,1 < \beta < 0,3 & \quad \kappa = 0,068; \quad m = 1. \end{aligned}$$

С целью сопоставления теплообмена плотного и падающего слоев была предпринята попытка обработать данные по теплообмену падающего слоя в тех же критериях подобия, что и для плотного слоя, т. е.

$$Nu = f(Fo), \quad (28)$$

хотя для падающего слоя подобная обработка весьма условна и груба.

Сравнение кривых $Nu = f(Fo)$ для плотного и падающего слоев позволяет отметить:

1) темп роста Nu при уменьшении Fo значительно выше для неплотного слоя по сравнению с плотным;

2) процесс теплообмена в неплотном слое протекает при значениях критерия Fo значительно меньших, чем для плотного слоя, в связи с чем для неплотного слоя достижимы значительно большие значения Nu ;

3) существуют две области значений Fo (или β) для неплотного слоя, в одной из которых интенсивность теплообмена выше, чем для плотного слоя, в другой — ниже. Граница этих областей не может быть установлена в общем виде, ибо зависит от сопоставляемого значения Fo для плотного слоя.

Для суждения о том, какое место занимают плотный и падающий слои в ряду теплоносителей по своей энергетической характеристике (под последней понимается затрата энергии на прокачку теплоносителя через канал и обратную транспортировку, приходящаяся на единицу переданного тепла), проведены вариантыные расчеты, показавшие, что и у плотного, и у падающего слоя очень хорошие энергетические характеристики, значительно лучшие, чем для газового потока.

V. ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. На основании предложенной модели процессов в падающем слое составлены и решены уравнения движения частиц (при целом ряде допущений). Получены аналитические выражения для скорости газа и максимального разрежения в канале.

2. Получены экспериментальные зависимости для истинной и расходной концентраций падающего слоя, коэффициента гидравлического сопротивления 2-фазного потока типа «падающий слой». Обнаружено резкое увеличение расхода неплотного слоя в сравнении с плотным.

3. Изучены условия перехода плотного слоя в падающий и наоборот. В связи с этим установлено существование помимо числа $Fr_{кр.1} = \frac{gD_k}{(w_{пред.т.пл})^2}$ числа $Fr_{кр.2} = \frac{gD_k}{(w_{пред.т.непл})^2}$.

4. Исследовано движение слоя в параллельных каналах и выявлены условия, обеспечивающие равномерность раздачи и движения слоя в различного типа сборках.

5. На основе изучения вопросов механики и аэродинамики падающего слоя проведено исследование его теплообмена со стенкой в вертикальном канале. Одновременно проведено исследование теплоотдачи плотного слоя в широком диапазоне температур.

6. Разработан и использован способ прямого нагрева слоя электропроводящей среды. Установлены электрические характеристики слоя.

7. Получены обобщенные зависимости для теплоотдачи плотного и падающего слоев (в последнем случае приведены 2 варианта зависимостей: первая связывает критерий Nu и объемную концентрацию слоя; вторая — относительную интенсивность теплообмена падающего слоя — в сравнении с теплоотдачей чистого газового потока, с весовой теплоемкостью и концентрацией слоя).

8. Установлено отсутствие заметного радиационного теплообмена и для плотного и для неплотного слоя при температурах слоя до 900°C .

9. Сопоставлена интенсивность теплообмена плотного и неплотного слоев. Установлено, что для неплотного слоя достижимы более высокие значения Nu .

10. Анализ энергетических характеристик плотного и неплотного слоев показал, что оба они являются достаточно эффективными теплоносителями; их характеристики значительно лучше, чем для чисто газового потока.

11. На основании полученных результатов проведены вариантыные расчеты регенератора газотурбинной установки ГТУ-800-50, работающего с применением в качестве промежуточного теплоносителя кварцевого песка. Как показывают

расчеты, организация движения такого промежуточного теплоносителя в форме падающего слоя обеспечивает снижение требуемой поверхности нагрева по сравнению со стандартными регенераторами в несколько раз.

Весьма эффективно можно использовать плотный или падающий слой, когда требуется рекуперативно нагреть или охладить какой-либо дисперсный технологический продукт.

Основное содержание диссертации изложено в следующих работах:

1. Горбис З. Р., Тонконогий Ю. Л. Исследование равномерности движения слоя дисперсной среды в параллельных каналах. ИФЖ, т. IV, № 6, 1963.

2. Тонконогий Ю. Л., Горбис З. Р. Элементы механики и теплообмена плотного и неплотного непродуваемых слоев. Тезисы докладов Всесоюзной н.-т. конференции «Применение кипящего слоя в химической промышленности», изд. «Химия», Л., 1965.

3. Тонконогий Ю. Л. Тезисы докладов на XXVI и XXVII научных конференциях ОТИЛ, Одесса, 1964, 1965.

Основные результаты докладывались автором:

1) на XXVI и XXVII научных конференциях ОТИЛ, Одесса, 1964, 1965;

2) на Всесоюзной н.-т. конференции «Применение кипящего слоя в химической промышленности», Ленинград, 1965.

—о—