

УДК 532.5:539.215

ОБТЕКАНИЕ ОДИНОЧНЫХ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ ТРУБ И ПУЧКОВ ТРУБ ВИБРОПСЕВДООЖИЖЕННОЙ ДИСПЕРСНОЙ СРЕДОЙ

Г. Д. КОСЕНКО, Е. Г. РЕШЕТНИКОВ, Б. Г. САПОЖНИКОВ, Н. И. СЫРОМЯТНИКОВ

(Свердловск)

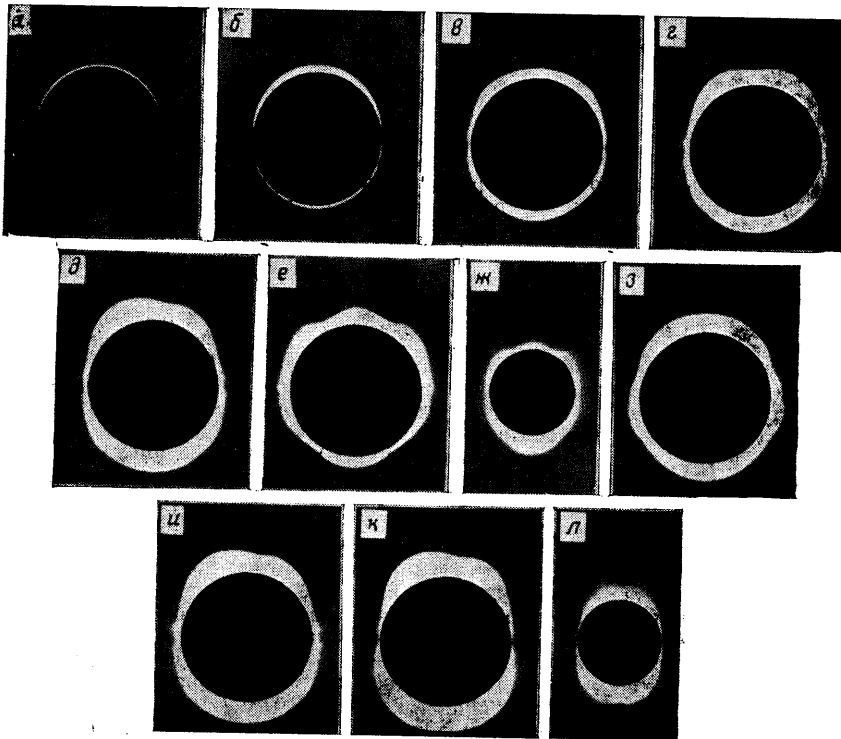
Обтекание горизонтальных труб вибропсевдоожигенной дисперсной средой было изучено экспериментально путем фотографирования в рентгеновских лучах, скоростной киносъемки и визуальных наблюдений при стробоскопическом освещении.

Исследования проводились в прямоугольной камере с размерами в плане 160×60 мм и высотой 200 мм, к прозрачным стенкам которой крепились исследуемая труба или пучок труб. При рентгенографии на задней стенке камеры в специальных пазах устанавливалась кассета с рентгеновской пленкой типа РМ-1. Источником рентгеновского излучения служила установка «Суперлилипут-200». Время экспозиции составляло 50 сек, при этом получалась усредненная по времени и по длине трубы картина обтекания. Расстояние от источника излучения до камеры равнялось 2,2 м, что практически обеспечивало параллельность лучей относительно образующих исследуемых труб.

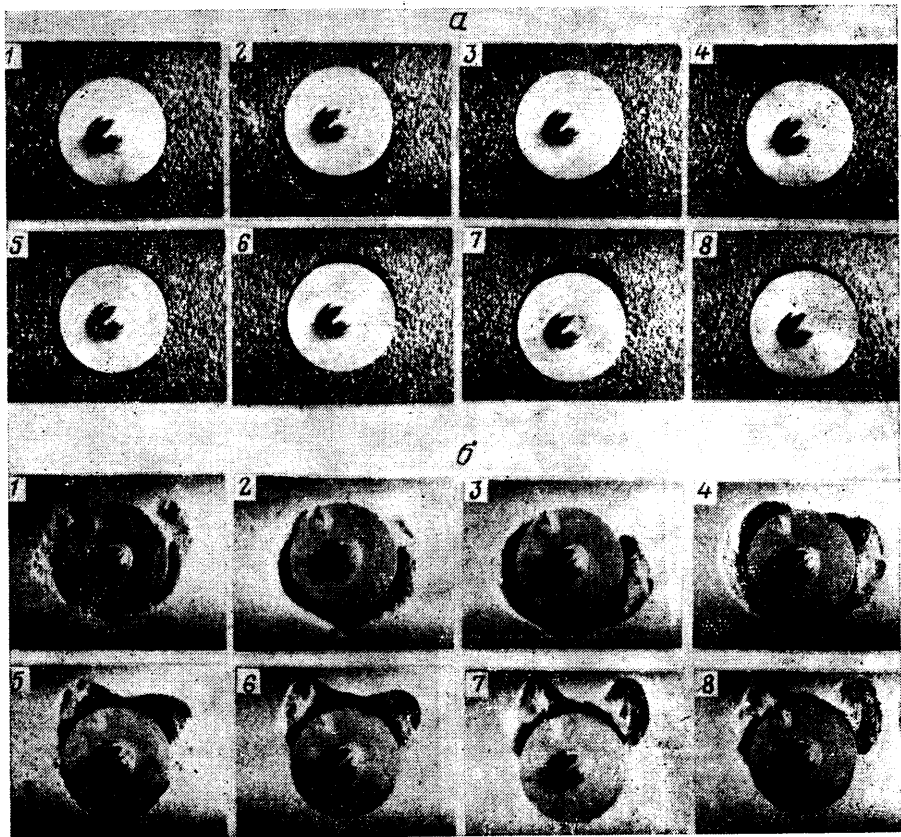
Скоростная киносъемка проводилась в отраженном и проходящем свете с помощью кинокамеры СКС-3М со скоростью 800–900 кадр/сек (время экспозиции $1/10\,000$ сек) и позволяла получить поэтапную картину обтекания. Для визуальных наблюдений при стробоскопическом освещении использовался строботометр СТ-5.

Экспериментальная камера вместе с исследуемой трубой или пучком труб жестко крепилась к виброплощадке, совершавшей вертикально направленные гармонические колебания с частотой $f=20-30$ гц и амплитудой $A=0.5-3.5$ мм по закону $z=A \sin(\omega t)$, где $\omega=2\pi f$ – угловая частота, t – время. При этом максимальное ускорение вибрации не превышало 10 g, где g – ускорение силы тяжести.

В качестве дисперсного материала применялся электрокорунд узких фракций со средним диаметром частиц $d=0.12, 0.32, 0.5$ и 0.8 мм, высота неподвижной засып-



Фиг. 1



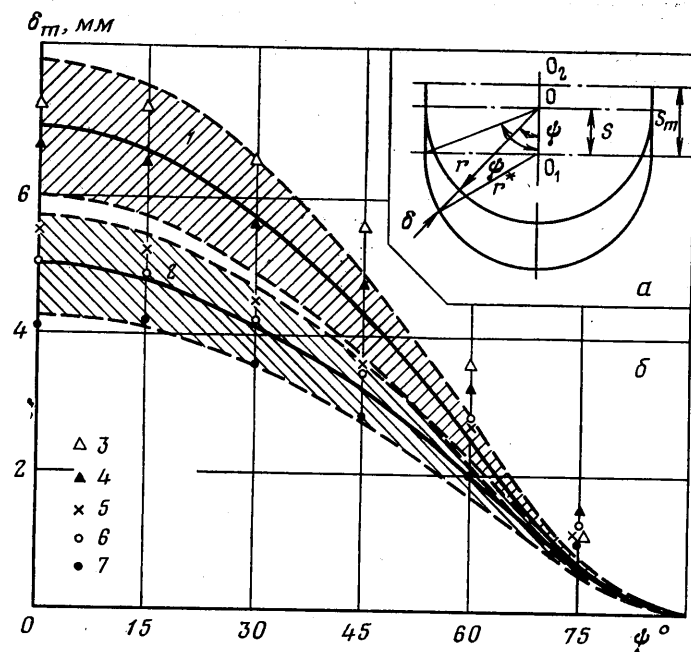
Фиг. 2

ки которого H_0 составляла 120–160 мм, а толщина в направлении излучения – 60 мм. Опыты проводились с одиночными горизонтальными трубами диаметром $D=25$ и 38 мм, а также однорядными и двухрядными (коридорными и шахматными) пучками из них, расположенными в центральной части слоя.

На фиг. 1 приведены типичные фотографии в рентгеновских лучах, иллюстрирующие среднюю картину обтекания одиночных труб виброслоем высотой 160 мм при $f=20$ гц и значениях d , A и D соответственно: $a-0.5, 1.0, 38$; $b-0.5, 1.5, 38$; $c-0.5, 2.5, 38$; $d-0.5, 3.0, 38$; $e-0.5, 3.5, 38$; $e-0.12, 3.5, 38$; $ж-0.12, 3.5, 25$; $з-0.32, 3.5, 38$; $и-0.5, 3.5, 38$; $к-0.8, 3.5, 38$; $л-0.8, 3.5, 25$ мм. Светлый ореол вокруг труб, величина и форма которого зависят от параметров вибрации ($a-\partial$), размера частиц ($e, з-\kappa$) и диаметра труб ($e, ж; \kappa, л$), представляет собой менее плотную для рентгеновских лучей дисперсную среду, чем вдали от трубы. Эта пограничная зона создается в результате взаимодействия вибропсевдооживленной среды и вертикально вибрирующей трубы, так как возникающие при этом силы инерции, максимальные на верхней и нижней образующих и минимальные на боковых участках, способствуют отрыву частиц от ее поверхности.

Механизм образования пограничной зоны можно проследить на кинограммах (фиг. 2), полученных в отраженном свете для $d=0.8$ (а) и 0.12 мм (б) и фазовых углах ωt от 0 (кадр 1) до 315° (кадр 8) с интервалом в 45° при $f=20$ гц, $A=3.5$ мм, $H_0=160$ мм, $D=38$ мм. Из фиг. 2,а видно, что в слое крупных частиц ($d=0.8$ и отчасти 0.5 мм) при движении трубы вверх из крайнего нижнего положения (кадры 7, 8, 1–3) под ней образуется зона, свободная от частиц, которая в этом смысле может быть названа разреженной. Аналогичная картина наблюдается и над трубой при ее движении вниз (кадры 3–7). Киносъемка в проходящем свете показала, что видимая на передней стенке камеры разреженная зона образуется по всей длине трубы.

Размеры этой зоны в поперечном сечении определяются диаметром трубы и параметрами вибрации. Последние влияют также на скорость перемещения дисперсной среды в виброслое. При скорости вибрации трубы, значительно превышающей



Фиг. 3

скорость материала, а также при достаточно большой газопроницаемости слоя, что выполнялось в условиях опыта, форма зоны, свободной от частиц, будет определяться лишь движением самой трубы. По этой причине объемлющая верхней или нижней разреженных зон (Фиг. 2,а) имеет вид, близкий к дуге окружности трубы, а в целом внешняя граница пограничной зоны вокруг трубы представляет собой овал (Фиг. 1, а - б, и, κ). Некоторое отклонение от овальной формы наблюдается для зоны над трубой (Фиг. 1, и, κ), так как здесь образованию свода из материала в значительной мере препятствуют силы тяжести.

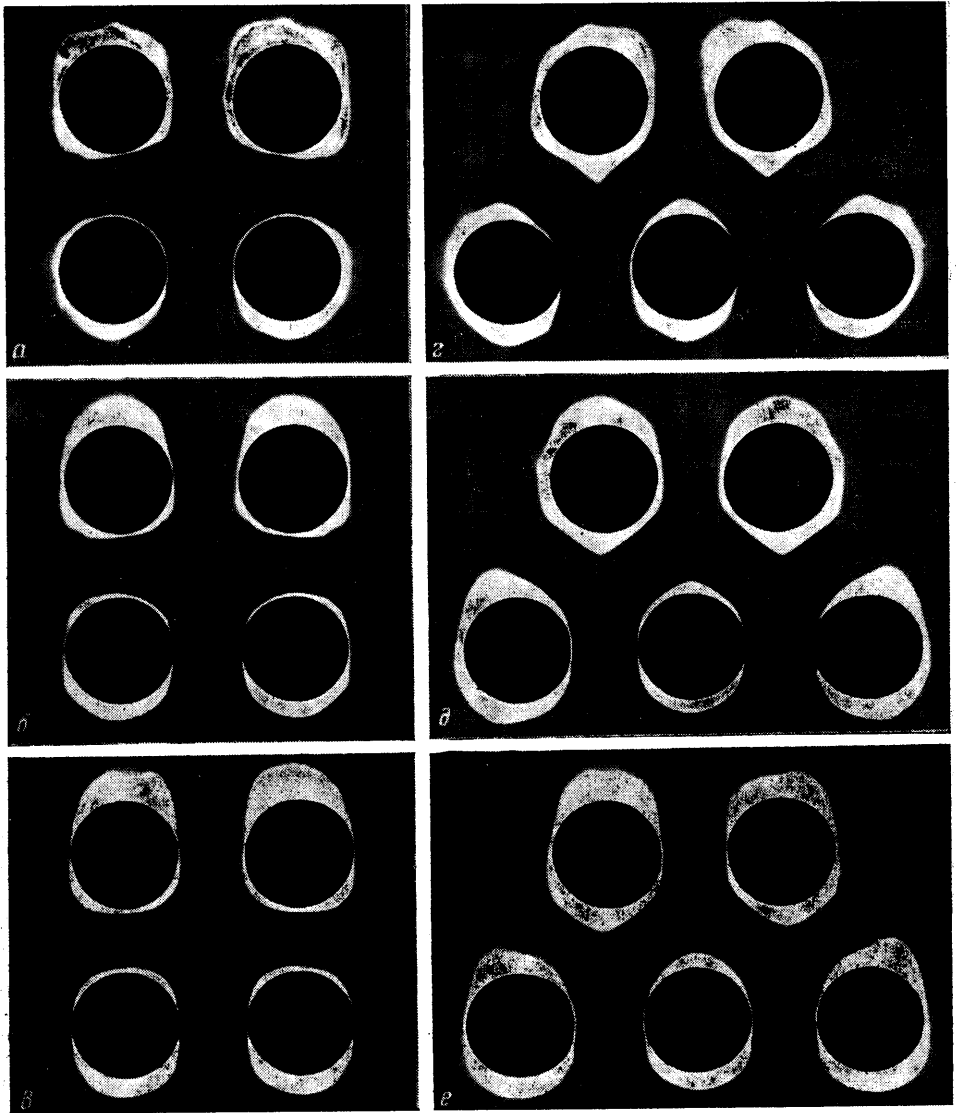
В вибропсевдооживленном слое мелкодисперсного материала ($d=0.12$ и отчасти 0.32 мм) над и под трубой также формируются зоны, свободные от частиц (Фиг. 2,б). Вследствие периодического изменения размеров этих зон и низкой газопроницаемости слоя в них наблюдаются значительные знакопеременные пульсации давления газовой среды $\Delta p = p - p_0$ [1], где p - мгновенное давление в пограничной зоне, p_0 - давление вдали от трубы, отрицательные под трубой и положительные над трубой при ее движении вверх и наоборот. При этом возникает заметная неустановившаяся фильтрация [2], при которой воздух входит в пограничную зону в периоды отрицательных перепадов давления Δp и выходит, когда перепады положительные. Так как в последнем случае укладка частиц в окрестности пограничной зоны более плотная [3], то избыток воздуха не успевает фильтроваться через слой, а формируется около поверхности трубы в виде пузырей. Поэтому, например, при движении трубы вниз (Фиг. 2, б, кадры 3-7) воздух вытесняется вдоль боковой поверхности в область над трубой, откуда часть его фильтруется через слой, а другая часть при движении трубой вверх (кадры 7, 8, 1-3) возвращается в область под трубой и т. д. Таким образом, для мелких частиц пограничная зона образуется не только на верхних и нижних, но и боковых участках трубы (Фиг. 1, е - з), и связана с гидродинамическими силами.

Приведенный на Фиг. 2 характер поэтапного обтекания трубы можно было наблюдать непосредственно при стробоскопическом освещении.

Овальность разреженной зоны для крупнодисперсных материалов (Фиг. 1, а - б, и, κ) позволяет предложить для нее следующую модель (Фиг. 3,а): в любой момент времени t нижняя или верхняя зона заключена между двумя полуокружностями радиусом $r=D/2$ с центрами O_1 и O , смещенными в вертикальном направлении на величину $S=A+A \sin(\omega t)$, причем $S_m=O_1O_2=2A$ (нужно отметить, что при изучении средней картины обтекания трубы можно получить лишь максимальную величину разреженной зоны δ_m).

Из Фиг. 3,а следует, что на угловом расстоянии ψ мгновенный зазор

$$(1) \quad \delta = S \cos \psi - r + \sqrt{r^2 - S^2 \sin^2 \psi}$$



Фиг. 4

а максимальный зазор

$$(2) \quad \delta_m = 2A \cos \psi - r + \sqrt{r^2 - 4A^2 \sin^2 \psi}$$

Уравнения (1), (2) справедливы при $\psi = 0 \div \psi_*$, где $\psi_* = \arctg(r/S)$. При $\psi = \psi_* \div +90^\circ$

$$(3) \quad \delta = r(1 - \sin \psi) / \sin \psi$$

и не зависит от τ .

На фиг. 3,б приведены кривые δ_m (сплошные линии), построенные по уравнениям (2) и (3) при значениях A соответственно: 1 - 3.5, 2 - 2.5 мм. Здесь же нанесены опытные точки для δ_m , измеренные на фотографиях в рентгеновских лучах (например, фиг. 1, в, д, ж) при $D=38$ мм и значениях d , A и f соответственно: 3 - 0.8 мм, 3.5 мм, 20 гц; 4 - 0.5, 3.5, 20; 5 - 0.8, 2.5, 30; 6 - 0.5, 2.5, 30; 7 - 0.8, 2.5, 20. Сравнение этих точек с расчетными данными (кривые 1, 2) показывает, что при $d \geq 0.5$ мм и $\psi < 60^\circ$ принятая модель качественно и количественно (с разбросом меньше 15% -

заштрихованные области) соответствует наблюдаемому явлению. Несколько большее отклонение опытных точек при $\psi = 60 \div 90^\circ$ связано с возможным влиянием газовой среды, которое не учитывалось при построении модели.

При погружении в вибропсевдооживленную среду однорядного пучка, например, с относительным шагом 1.71 характер обтекания ничем не отличался от одиночной трубы, так как расстояние между трубами было сравнительно большим и формирование пограничной зоны для каждой трубы было независимым.

При погружении двухрядного пучка картина обтекания зависела от типа пучка (коридорного или шахматного) и от того, в каком ряду была расположена труба. Из фотографий в рентгеновских лучах на фиг. 4, полученных при $f = 20$ гц, $H_0 = 160$ мм, $D = 25$ мм, $A = 3.5$ мм, относительных шагах 1.71 и значениях d соответственно: а, $g = 0.12$; б, $d = 0.32$; в, $e = 0.8$ мм, следует, что независимо от типа пучка верхняя часть труб верхнего ряда и нижняя часть труб нижнего ряда омываются так же, как и одиночная труба (см. фиг. 1, ж, л).

Для коридорного пучка около участков поверхности труб, обращенных друг к другу (фиг. 4, а - в), пограничная зона существенно меньше, чем для одиночной трубы и практически не зависит от диаметра частиц. Это связано с тем, что в пространстве между нижними частями верхних труб и верхними частями нижних образуются застойные зоны [4], так как дисперсная среда в основном перемещается в вертикальных проходах между трубами. В шахматном пучке застойные зоны отсутствовали, потому что дисперсная среда свободно циркулировала около каждой трубы, на что указывает форма пограничной зоны в виде косоугольных треугольников на соответствующих участках поверхности труб (фиг. 4, г - е).

Поступила 27 IX 1977

ЛИТЕРАТУРА

1. Kroll W. Über das Verhalten von Schüttgut in lotrecht schwingenden Gefassen, Forsch. Geb. Ingenieurwesens, 1954, Bd 20, Nr 1.
2. Блехман И. И., Джанелидзе Г. Ю. Вибрационное перемещение. М., «Наука», 1964.
3. Рыжков А. Ф. Исследование равномерности распределения материала в аппаратах с виброкипящим слоем. В сб. «Промышленные печи с кипящим слоем». Свердловск, Изд. Уральск. политехн. ин-та, 1976.
4. Сапожников В. Г., Косенко Г. Д., Решетников Е. Г. Влияние насадки из горизонтальных труб на гидродинамику и теплообмен в вибрирующем слое тонкодисперсного материала. Тр. Уральск. политехн. ин-та, 1974, сб. 227.

УДК 532.516+533.6.011.8

РАСЧЕТ ТЕЧЕНИЯ ВЯЗКОГО ГАЗА В ГИПЕРЗВУКОВОМ СОПЛЕ С УЧЕТОМ КОЛЕБАТЕЛЬНОЙ НЕРАВНОВЕСНОСТИ

М. И. МУЧНАЯ

(Новосибирск)

В работе [1] изложены метод и результаты решения задачи о вязком течении в гиперзвуковом осесимметричном сопле с помощью уравнений «узкого канала». В расчете использовались реальные равновесные свойства газа. Сравнение с экспериментом показало, что в случае длинного гиперзвукового сопла с высокими значениями давления и температуры в форкамере совпадение расчетных и экспериментальных данных нельзя признать удовлетворительным. Выказано предположение, что учет колебательной неравновесности может улучшить результаты расчета. Для проверки этого предположения выполнена настоящая работа, в которой в рамках теории двухтемпературной релаксации и принятой в [1] модели течения учтена колебательная неравновесность.

1. Газ находится в форкамере при высокой температуре и давлении в состоянии термодинамического равновесия. При расширении в сопле обмен энергией между инертными колебательными и активными поступательными и вращательными степенями свободы затрудняется в силу конечности скорости релаксации, и при достаточном расширении обмен энергией в ядре потока практически прекращается — наступает замораживание колебательных степеней свободы. Используя для расчета