

6  
А-52

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ

РСФСР

УРАЛЬСКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ  
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ имени С.М.КИРОВА

На правах рукописи

М А С К А Е В

Владимир Кузьмич

ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИКИ И ВНЕШНЕГО ТЕПЛООБМЕНА

В ПСЕВДООБЖИЗНЕННОМ ГАЗОВЗВЕСЬЮ СЛОЕ

(№ 05.14.04 - Промышленная теплоэнергетика)

А в т о р е ф е р а т

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Свердловск

1973

621.036  
A 52

Псевдоожженный слой в настоящее время широко применяется для сушки, нагрева и термообработки различных материалов. В ряде случаев целесообразно использовать слой относительно крупных частиц, ожженный газозвесью. Если процессы в "обычном" псевдоожженном слое исследованы детально, то на изучение свойств псевдоожженного запыленным агентом слоя до последнего времени обращалось мало внимания. Между тем, использование запыленного слоя дает ряд преимуществ, основным из которых является возможность регулирования качества псевдоожжения и критической скорости в широких пределах изменением концентрации пыли в ожжающей среде. Большие концентрации мелкодисперсной пыли позволяют увеличить интенсивность внутреннего и внешнего теплообмена по сравнению с незапыленным псевдоожженным слоем.

Основное внимание в реферируемой работе уделено изучению влияния концентрации мелкодисперсной пыли на качество псевдоожжения, скорость начала псевдоожжения и интенсивность внешнего теплообмена. С целью выяснения механизма внешнего теплообмена исследовалось распределение скоростей в незапыленном слое крупных ( $d_{\text{ч}} = 2,7 - 12,92 \text{ мм}$ ) частиц, распределение скоростей газозвеси и концентраций пыли по сечению запыленного слоя.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и приложений.

В первой главе дается обзор литературы по гидродинамике и внешнему теплообмену в псевдоожженном слое.

На основе анализа литературных данных было установлено, что в слое крупных частиц скорость начала псевдоожжения



существенно уменьшается с увеличением плотности оживающей среды. Эффективную плотность среды можно увеличить за счет добавок в нее мелкодисперсной пыли. При этом удалось бы варьировать коэффициентом сопротивления и плавно изменять скорость начала псевдооживения. Следует отметить, что в печати практически полностью отсутствуют экспериментальные и теоретические работы, посвященные данной проблеме.

Литературные данные о влиянии эффективной плотности среды на качество псевдооживения показывают, что с ростом плотности агента уменьшаются размеры пузырей, улучшается равномерность и однородность псевдооживения. При больших давлениях характеристики псевдооживенного газом слоя приближаются к таковым в жидкостных слоях. Однако в литературе отсутствуют данные о влиянии на качество псевдооживения добавок в оживающую среду мелкодисперсных частиц, которые ведут также к увеличению эффективной плотности оживающей среды.

На основании критического обзора литературы о методах измерения действительных скоростей псевдооживающего агента в слое сделан вывод, что наиболее простым и надежным является использование пневмометрической трубки специальной конструкции с тарировкой ее в исследуемом слое. Однако такие трубки дают надежные результаты лишь в слое достаточно крупных частиц, когда скоростной напор достаточно велик по сравнению с пульсациями давления, характерными для псевдооживенного слоя.

Большинство данных по теплообмену между псевдооживенным слоем и поверхностью получено для мелких частиц размером не крупнее 4,5 - 5 мм, в то время как данные по теплообмену в слое более крупных частиц, так же как и данные по внешнему

теплообмену в запыленном слое практически полностью отсутствуют.

Описанные в литературе установки для исследования гидродинамики и теплообмена с использованием двухфазных потоков обладают рядом недостатков, основной из которых - трудность надежного определения параметров запыленной среды.

В соответствии с изложенным в задачи исследования входило:

1. Разработать экспериментальную установку, позволяющую с хорошей точностью контролировать параметры газозвеси.
2. Исследовать влияние концентрации мелкодисперсных частиц  $\mu$  в газозвеси на качество псевдооживения.
3. Исследовать сопротивление оживенного газозвесью слоя и зависимость критической скорости  $W_{см}$  от концентрации  $\mu$ .
4. Для выяснения механизма теплообмена разработать методику и экспериментально определить поле скоростей газа по сечению незапыленного слоя.
5. Разработать методику и определить поля скоростей и концентраций по сечению запыленного слоя.
6. Исследовать внешний теплообмен в псевдооживенном слое крупных частиц при отсутствии пыли.
7. Исследовать влияние концентрации пыли на интенсивность внешнего теплообмена.
8. Рассмотреть возможность промышленного применения слоя оживаемых газозвесью частиц.

Вторая глава посвящена описанию построенных экспериментальных установок для изучения процессов в двухфазных потоках.

Установка непрерывного действия замкнута по мелкодисперсной твердой фазе и разомкнута по газовой фазе. Газовзвесь образовывалась в аэрационной камере, куда сверху шнековым питателем подавались частицы корунда размером 80 мкм, а снизу - воздух. Надежная работа шнека обеспечивалась системой компенсации избыточного давления воздуха в камере оживления, исключающей утечки воздуха помимо рабочего канала. Из аэрационной камеры после прохождения участка гидродинамической стабилизации, газовзвесь оживала слой относительно крупных ( $d_n = 2-12,92$  мм) частиц. Из псевдооживленного слоя газовзвесь направлялась в пылеотделительный узел. Здесь корундовая пыль отделялась от воздуха и возвращалась в бункер шнекового питателя. Очищенный воздух выбрасывался в атмосферу. Основные параметры установки следующие:

производительность компрессора	- 650 м <sup>3</sup> /час
максимальное давление	- 0,8-1,0 бар
максимальная производительность шнекового питателя	
диаметром 70 мм	- 2180 кг/час
диаметром 123 мм	- 13800 кг/час
производительность пылеотделительного узла по корунду	- 16000 кг/час
диаметр экспериментального канала	- 123 или 96 мм.

В ряде опытов использовалась установка периодического действия разомкнутого типа как по газовой, так и по твердой фазам. Газовзвесь создавалась в аэрационной камере описанным выше способом. Питателем пыли служил шнек диаметром 42 мм. Надежная работа шнека обеспечивалась отсутствием перепада

давления между аэрационной камерой и бурчком шнекового питателя. После перемещения всей пыли из бункера в пылеотделительный узел, установка выключалась и пыль пересыпалась из пылеотделительного узла в бункер шнекового питателя. Основные параметры установки следующие:

производительность компрессора	- 36 м <sup>3</sup> /час
максимальное давление	- 7 бар
максимальная производительность шнекового питателя по корунду	- 140 кг/час
время непрерывной работы	- 1-2 часа
диаметр экспериментального канала	- 50 мм.

Расходная концентрация корундовой пыли рассчитывалась по производительности шнекового питателя и расходу воздуха, замеренного с помощью нормальной диафрагмы. При этом максимальная среднеквадратичная ошибка определения  $\mu$  не превышала 1,8%.

В третьей главе приводятся результаты исследования гидродинамики псевдооживленного газовзвесью слоя крупных частиц.

Исследовано качество псевдооживления слоя алундовых частиц диаметром 12,92 мм. При этом высота слоя в неподвижном состоянии равнялась 160 мм, а его диаметр - 123 мм. О качестве псевдооживления судили по величине коэффициента

$$K = \frac{\tilde{\Delta p}}{\bar{\Delta p}} \cdot 100\% , \quad (1)$$

где  $\tilde{\Delta p}$  среднеквадратичное отклонение перепада давления от его среднего значения  $\bar{\Delta p}$  :

$$\tilde{\Delta p} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T [\Delta p(\tau) - \bar{\Delta p}]^2 d\tau} \quad (2)$$

Среднее значение перепада давления

$$\bar{\Delta p} = \frac{1}{T} \int_0^T \Delta p(\tau) d\tau \quad (3)$$

В формулах (2) и (3) величина  $\Delta p(\tau)$  есть мгновенное значение перепада давления.

Изменяющийся во времени перепад давления замерялся двумя отборниками специальной конструкции, исключающей забивание отверстий мелкодисперсной пылью. Отборники располагались на высоте 50 и 100 мм от решетки на оси слоя.

Среднеквадратичное отклонение  $\tilde{\Delta p}$  определялось с помощью комплекса приборов. Величина  $\bar{\Delta p}$  определялась после демпфирования изменяющегося во времени  $\Delta p(\tau)$ . При этом максимальная среднеквадратичная ошибка измерений коэффициента  $K$  составляла  $\pm 9,8\%$ .

Опыты с незапыленным слоем показали (рис. I, а), что слой является явно неоднородным, пульсации сопротивления в нем могут составлять 40-50% ( $K_r = 40-50\%$ ) от среднего значения сопротивления.

Опыты с запыленным слоем проводились при  $W_r = 1,25$ . В качестве мелкодисперсных частиц использовался корунд со средним размером 80 мкм. На рис. I, б представлены результаты исследования с концентрацией  $\mu$  до 19,0 кг/кг. Добавление пыли в оживающий газ в малых ( $\mu \leq 2$  кг/кг) количествах практически не влияет на однородность псевдооживленного слоя. Дальнейшее увеличение концентрации до 10 кг/кг вызывает резкое улучшение однородности. При этом эффективная амплитуда пульсаций давления уменьшается в 4,5-5 раз и составляет всего 15-20%

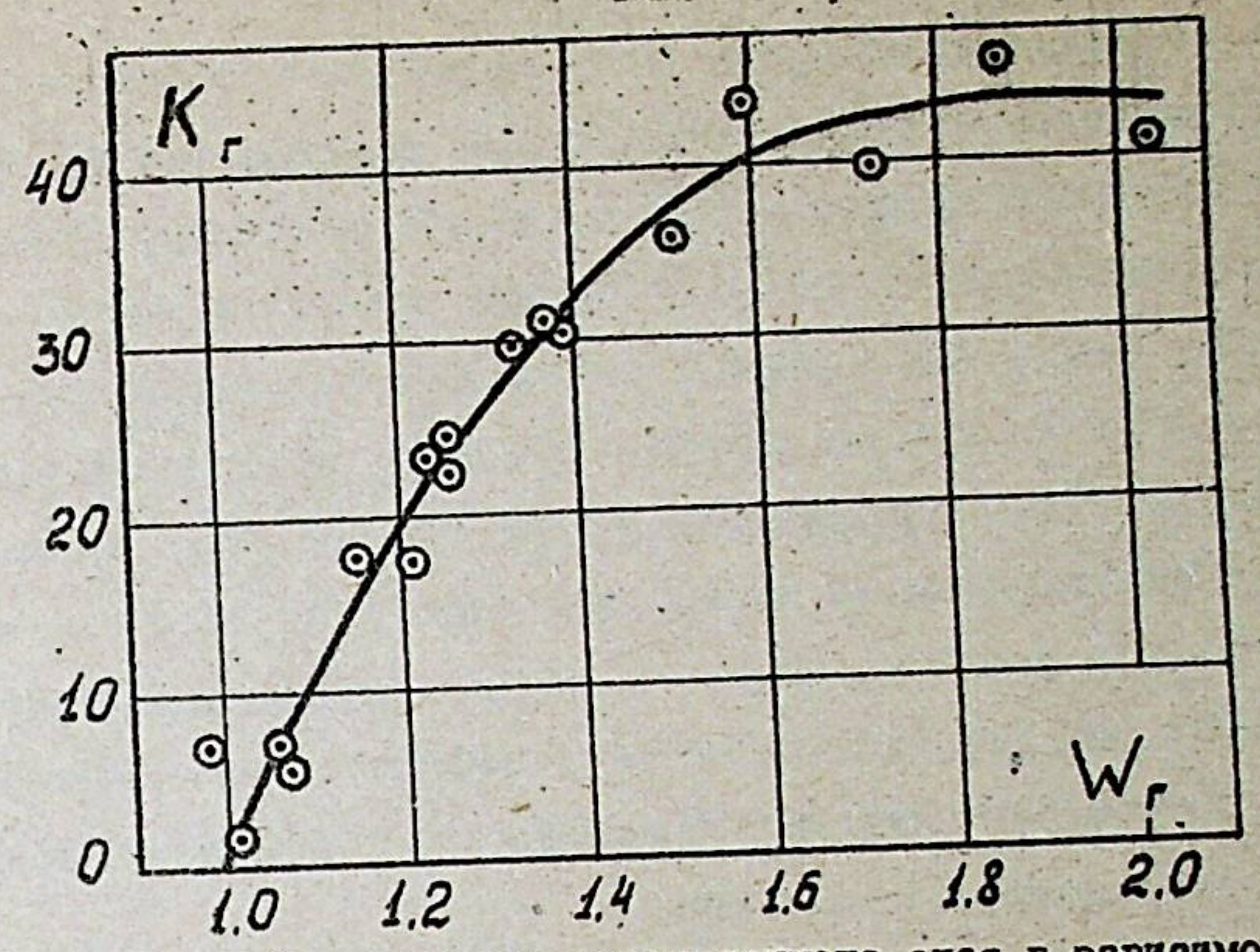


Рис. I, а. Однородность незапыленного слоя в зависимости от числа псевдооживления.  $K_r$ , %

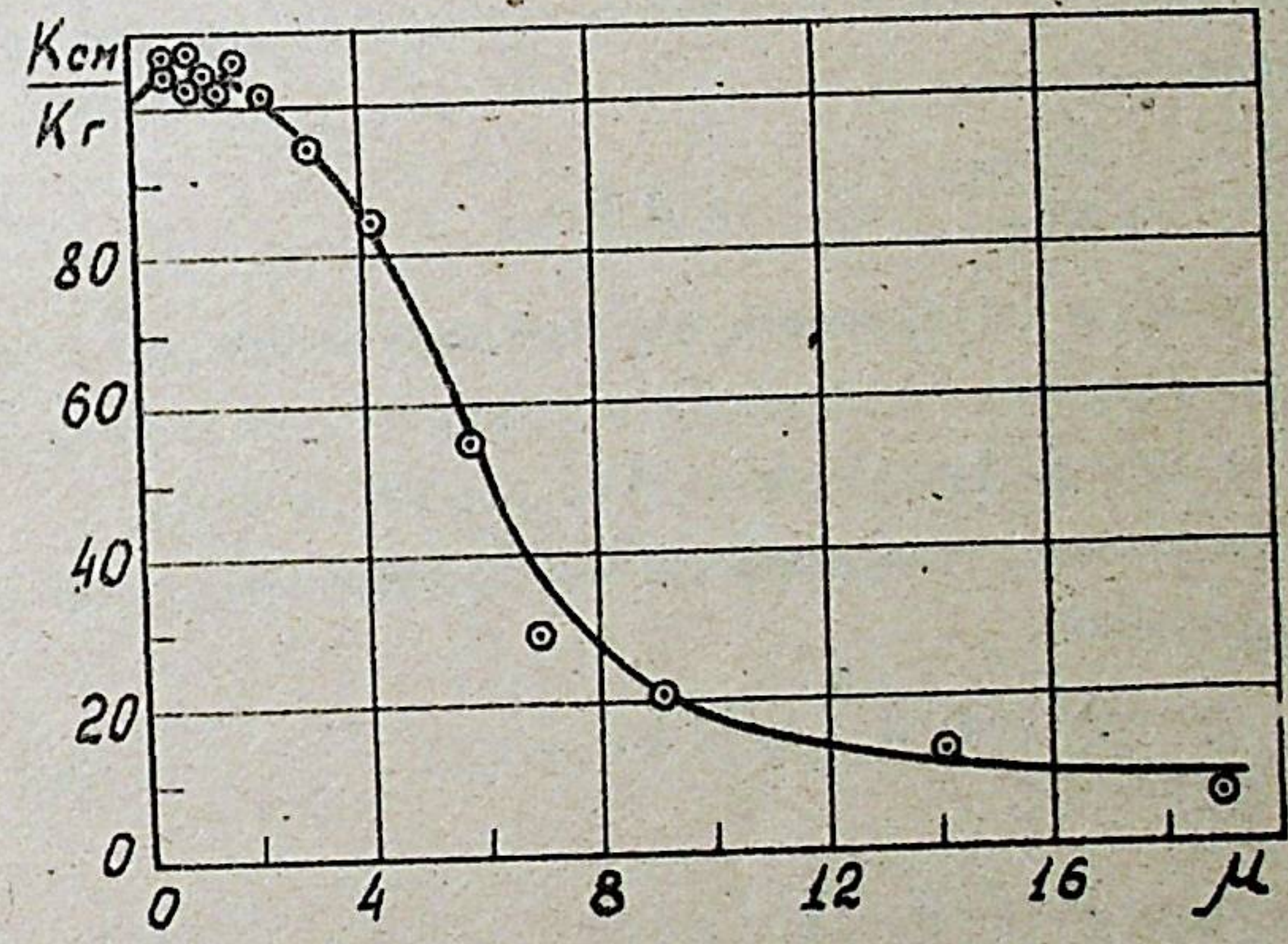


Рис. I, б. Изменение однородности запыленного слоя при  $W_r = 1,25$ .  $K_{sm}/K_r$ , %

от таковой в незапыленном слое. Визуально наблюдается коренное изменение структуры слоя. В слое без пыли при  $W_r = 1,25$  перемешивание крупных частиц незначительно, скорости их движения невелики. В слое много крупных пузырей и газовых прослоек, образующихся рядом с решеткой. В запыленном слое при  $\mu \geq 10$  кг/кг газовые пузыри и прослойки практически исчезают. Довольно четко определяется верхняя граница псевдооживления.

Экспериментально исследовано влияние концентрации мелкодисперсной пыли на скорость начала псевдооживления. Обнаружено (рис. 2), что при увеличении  $\mu$  скорость начала псевдооживления уменьшается. Получено выражение для коэффициента трения  $\xi_{см}$  в запыленном слое в виде

$$\xi_{см} = \frac{11,6}{Re_r^{0,25}} (1 + 0,23\mu) \quad (4)$$

Тогда скорость начала псевдооживления запыленного слоя можно подсчитать как

$$\frac{Re'_{см}}{Re_r} = (1 + 0,23\mu)^{-0,57} \quad (5)$$

Формулы (4) и (5) проверены при изменении параметров в следующих пределах:  $\mu$  от 0 до 18-20 кг/кг;  $d_ч$  от 2 до 12,92 мм;  $\rho_ч$  от 1390 до 11300 кг/м<sup>3</sup>;  $Re'_{см}$  от 187 до 4010.

Для расчета расширения оживленного газозвесью слоя получено уравнение

$$X^3 + aX^2 + bX + c = 0, \quad (6)$$

где

$$X = \left( \frac{H_{см}}{H_0} \right)^{\frac{1}{3}} ;$$

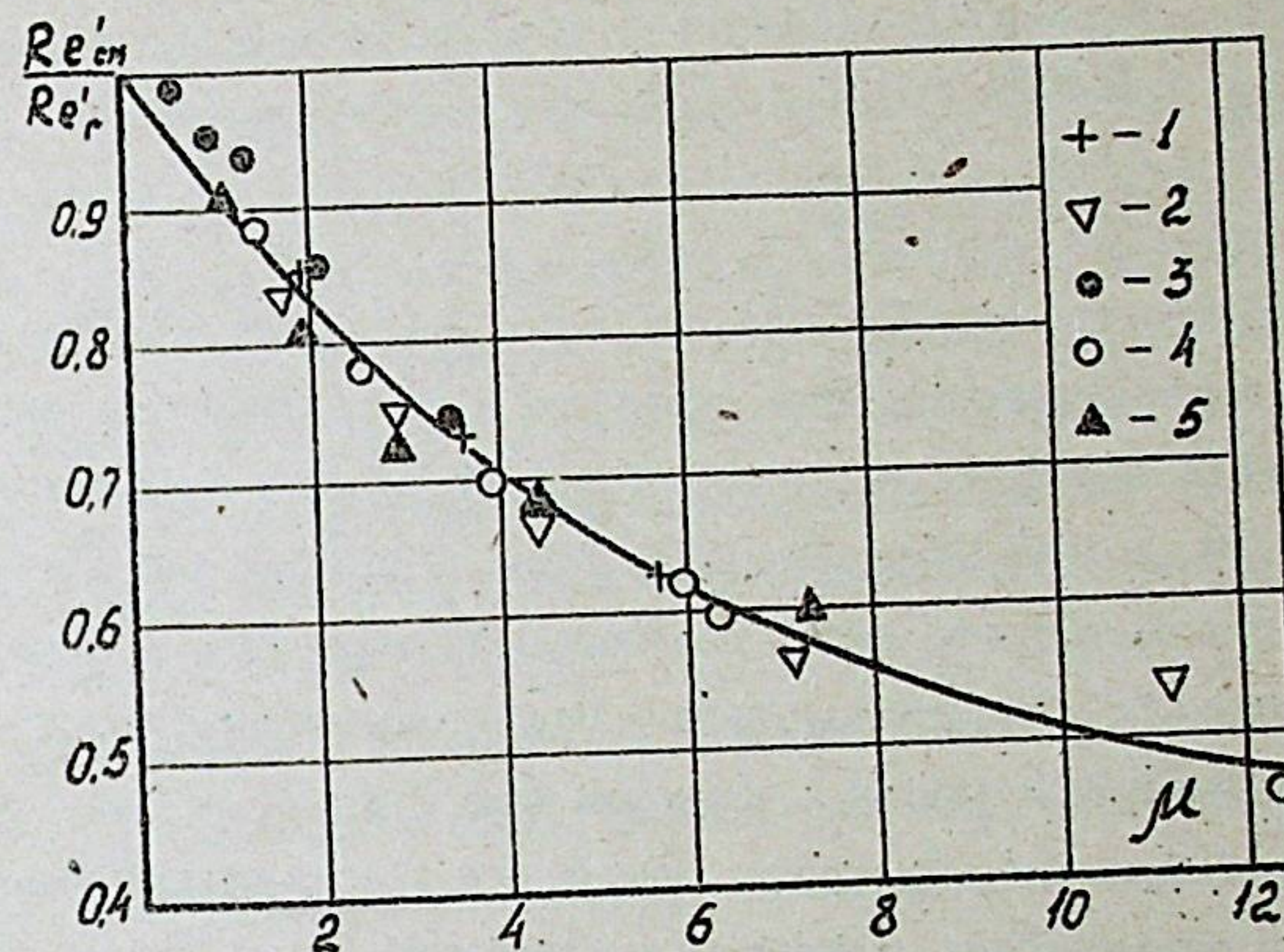


Рис. 2. Зависимость относительного критического числа Рейнольдса от концентрации.

1 - горох,  $d_ч = 5,65$  мм; 2 - сталь,  $d_ч = 2,00$  мм;  
3 - сталь,  $d_ч = 6,31$  мм; 4 - алунд,  $d_ч = 4,54$  мм;  
5 - алунд,  $d_ч = 5,52$  мм

$$a = -\bar{\epsilon}_0 \left[ (1 + 0,23\mu)^{\frac{1}{2-n}} \cdot W_r \right]^{\frac{2-n}{3}};$$

$$b = 0;$$

$$c = -(1 - \bar{\epsilon}_0);$$

$$n = 1, \text{ если } 35 \leq Re_r \text{ и } n = 0,25, \text{ если } 70 \leq Re_r \leq 7000.$$

Изучено распределение скоростей в псевдооживленном слое алуновых частиц с  $d_{\text{ч}} = 2,7, 6,7$  и  $12,92$  мм и стальных шариков с  $d_{\text{ч}} = 9,53$  мм на разных высотах от решетки как с погруженным в слой телом, так и без него. Скорость газа в слое вычислялась по среднеквадратичному напору пневмометрических трубок щелевой конструкции с размером щели  $0,8 \times 3 d_{\text{ч}}$  мм<sup>2</sup> с учетом локальной порозности. Предварительно пневмометрические трубки тарировались в аэродинамической трубе и в исследуемом слое. Локальная порозность псевдооживленного слоя находилась с учетом распределения локальной порозности неподвижного слоя и степени расширения псевдооживленного слоя. Максимальная среднеквадратичная ошибка определения скорости не превышала  $\pm 13,0\%$ .

Было обнаружено, что скорости газа не одинаковы по сечению слоя. У вертикальных поверхностей они больше средних скоростей по сечению, а по мере удаления от стенки профиль скоростей все более выравнивается. Следует отметить, что профиль скоростей в какой-то мере повторяет распределение порозности по сечению. Однако, чем выше число псевдооживления и выше средняя порозность слоя, тем более плоским становится профиль скоростей. При повышении скорости фильтрации в два раза средняя действительная скорость по сечению увеличивается всего в

1,2 раза. На расстоянии 0,7 мм от стенки скорость даже несколько уменьшается с увеличением  $W_r$ . Профиль скоростей, измеренный на высоте 50 мм от решетки в слое без погруженного тела, практически не отличается от такового на высоте 130 мм.

Поля скоростей в слоях крупных и мелких частиц подобны, но чем меньше диаметр частиц, тем меньше максимальное значение скорости отличается от средней скорости по сечению. Если при  $W_r = 1$  скорость на расстоянии 0,7 мм от стенки в слое с  $d_{\text{ч}} = 12,92$  мм больше средней действительной в  $\sim 1,75$  раза, то в слое алуновых частиц диаметром 2,7 мм - всего в 1,4 раза. Причем, в псевдооживленном слое относительно мелких частиц профиль скоростей становится плоским уже на расстоянии  $1,5-2,0 d_{\text{ч}}$  и менее от стенки.

Поля скоростей определялись и при погружении в слой по его оси цилиндрических зондов диаметром 10 и 40 мм с обтекаемыми на концах. Опыт показал, что скорости газа вблизи цилиндров мало отличаются от таковых у стенки канала.

Получено решение для распределения скоростей по сечению слоя в виде

$$\frac{v_x}{W_r} = W_r \left\{ \frac{1 - \frac{H_0}{H_r} (1 - \epsilon_{0x})}{\left[ 1 - \frac{H_0}{H_r} (1 - \epsilon_0) \right]^{\frac{2}{1+n}}} \cdot \frac{1 - \bar{\epsilon}_0}{1 - \epsilon_{0x}} \right\}^{\frac{1+n}{2-n}}, \quad (7)$$

где  $n = 1$  при  $35 \leq Re_r$  и  $n = 0,25$  при  $70 \leq Re_r \leq 7000$ . Сопоставление расчетных скоростей по уравнению (7) с опытными данными показало, что уравнение неплохо описывает характер изменения действительных скоростей при увеличении  $W_r$ .

Изучено распределение концентраций мелкодисперсной пыли и скоростей газозвеси по сечению псевдоожиженного слоя. Суть методики определения этих параметров заключается в следующем. Независимо от распределения порозности, в любом вертикальном сечении сопротивление слоя одно и то же. Это сопротивление определяется как локальной скоростью, так и локальной концентрацией. Учет взаимосвязи этих величин дает возможность определить и скорость газозвеси, и концентрацию, если известны: распределение скоростей при том же числе псевдоожижения в незапыленном слое, локальный расход пыли через пылеотборник (щель пылеотборника была аналогичной щели пневмометрической трубки) в зависимости от скорости газозвеси в нем, локальная порозность запыленного слоя. Тогда:

$$v_{cmx} = \frac{G_{отx}(v_{cmx})}{\mu_x \cdot \rho_g \cdot S_{от} \cdot \epsilon_{cmx}} \quad (8)$$

$$v_{cmx} = v_x \left[ \frac{H_r}{H_{cm}} \left( \frac{1 - \epsilon_x}{\epsilon_x} \cdot \frac{\epsilon_{cmx}}{1 - \epsilon_{cmx}} \right)^{1,25} \frac{1}{1 + 0,23 \mu_x} \right]^{1,75} \quad (9)$$

Здесь  $G_{отx}$  - секундный расход пыли через пылеотборник;

$S_{от}$  - площадь сечения щели пылеотборника;

$G_{отx}(v_{cmx}) = f(v_{cmx})$  - определяется эксперимен-

тально.

Система уравнений (8) и 9) при определении  $v_{cmx}$  и  $\mu_x$  решается методом последовательных приближений. Максимальные среднеквадратичные ошибки определения  $v_{cmx}$  и  $\mu_x$  по данной методике соответственно равны  $\pm 16,0$  и  $\pm 3,2\%$ .

Опыты проводились в слое алундовых частиц размером 12,92 мм при диаметре слоя 123 мм и высоте в неподвижном состоянии 160 мм. На рис.3 показано распределение действительных скоростей среды по сечению псевдоожиженного слоя в зависимости от средней расходной концентрации. У стенки канала в незапыленном слое скорость газа много выше средней по сечению. С добавлением пыли при том же расходе газа происходит перераспределение скоростей из-за неравномерного распределения пыли по сечению. На рис.4 а,б показано изменение локальных скоростей и концентраций на расстоянии 0,8 мм от стенки канала и цилиндров при  $W_r = 1,25$ . Цилиндры установлены в слое по его оси. Видно, что наряду со значительным снижением скорости с ростом  $\mu$  происходит резкое увеличение локального значения  $\mu_x$ .

В четвертой главе приведены результаты исследования теплообмена псевдоожиженного газозвесью слоя крупных частиц с боковой поверхностью вертикальных цилиндрических медных зондов активной длиной 100 мм и диаметром 10, 15, 25 и 40 мм с теплоизолированными обтекаемыми торцами. Коэффициент теплоотдачи определялся по стационарной методике. Максимальная среднеквадратичная ошибка его измерения не превышала  $\pm 5,1\%$ . Исследования проводились в каналах диаметром 123 и 96 мм. Высота насыпного слоя не менялась и была равной 160 мм.

Опыты показали, что, как и при псевдоожижении мелких частиц, коэффициенты теплоотдачи растут до скорости, соответствующей критической точке. При дальнейшем увеличении скорости коэффициенты теплоотдачи меняются мало, оставаясь практически постоянными до  $W_r = 1,5-2,0$ . Более высоких чисел псевдоожи-



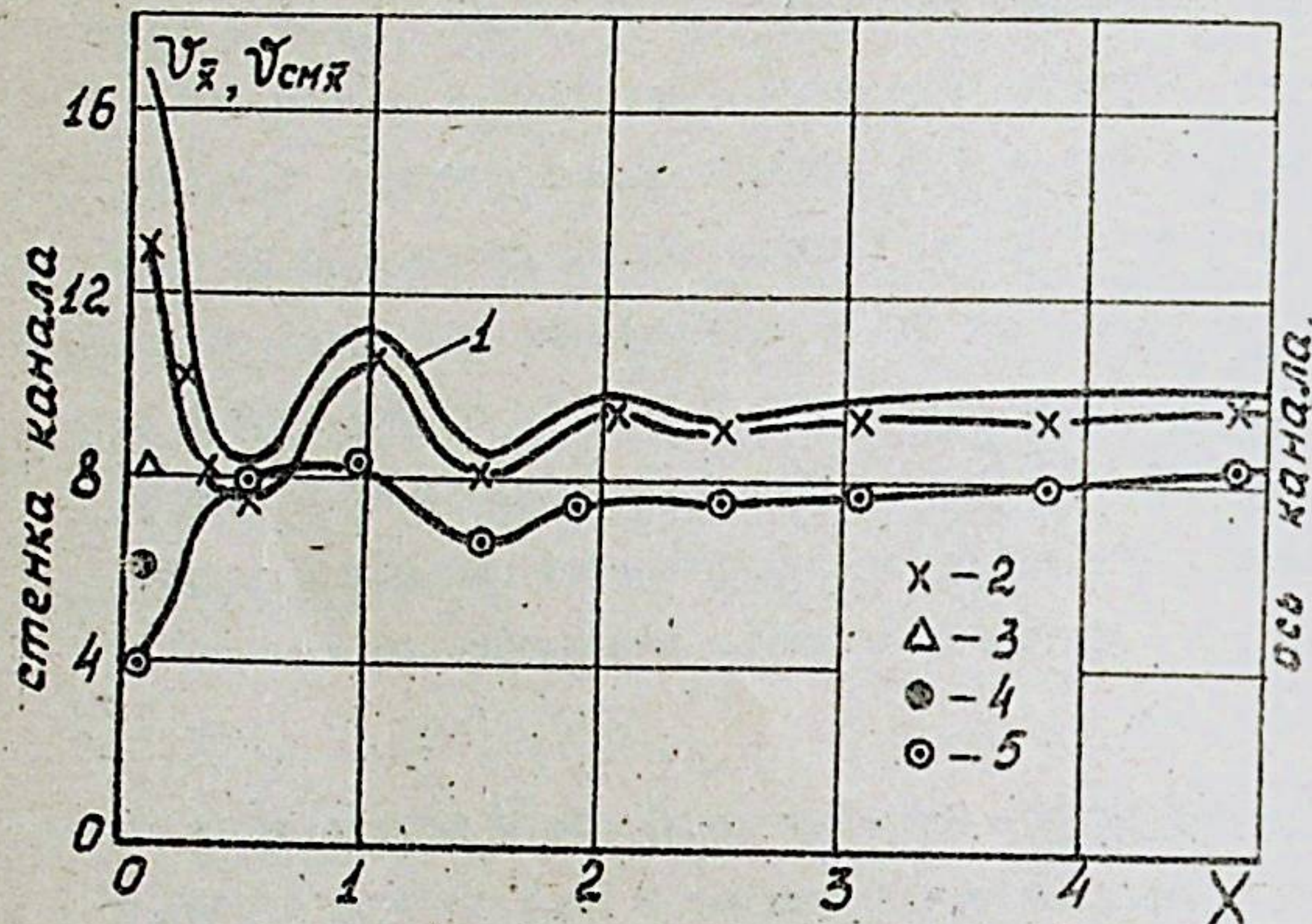


Рис. 3. Поля скоростей в псевдооживленном слое при  $W_r = 1,25$ .  $V_{смx}$ ,  $V_x$ , м/сек.  
 1 -  $\mu = 0$ ; 2 -  $\mu = 0,92$  кг/кг;  
 3 -  $\mu = 2,3$  кг/кг; 4 -  $\mu = 3,39$  кг/кг;  
 5 -  $\mu = 6,98$  кг/кг.

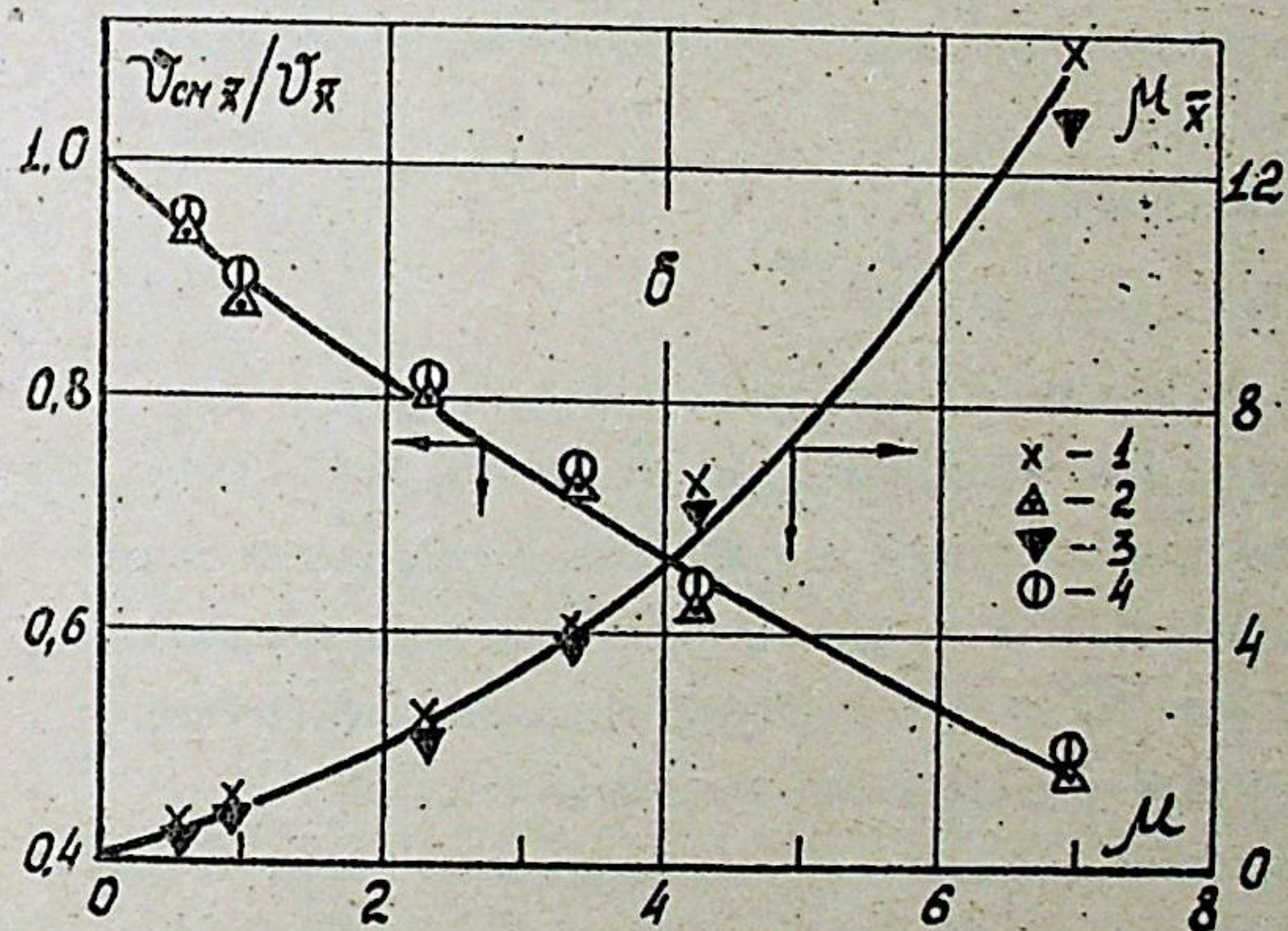
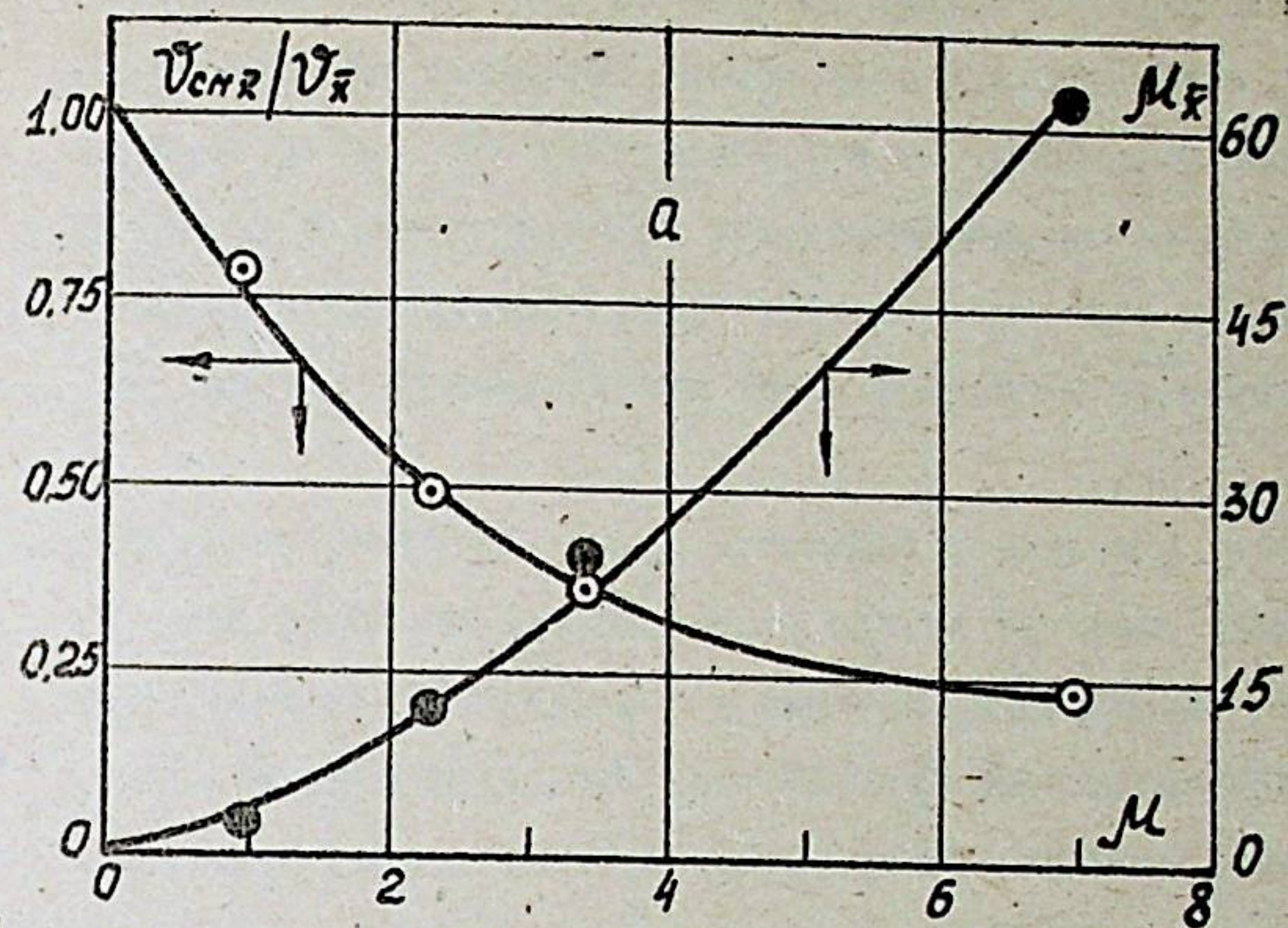


Рис. 4. Перераспределение скоростей и расходных концентраций в псевдооживленном слое у стенки канала (а) и цилиндров (б) на расстоянии 0,8 мм от их поверхностей.  
 1, 2 -  $d_3 = 10$  мм; 3, 4 -  $d_3 = 40$  мм.

жения в слое крупных частиц достичь не удастся. В слое крупных частиц интенсивность теплообмена определяется преобладающим влиянием конвекции. Но при увеличении  $W_r$  скорость газа у поверхности не увеличивается, как показано выше, а остается постоянной или даже уменьшается. Такое постоянство действительных скоростей и обуславливает незначительное влияние  $W_r$  на  $\alpha$ .

На рис.5 показана зависимость  $\alpha_{max}$  от диаметра частиц. С увеличением диаметра частиц увеличиваются скорости газа у поверхности теплообмена, а равно и конвективная составляющая суммарного коэффициента теплоотдачи. Это ведет к увеличению интенсивности внешнего теплообмена. Поэтому в слое крупных частиц удается достигнуть таких же  $\alpha$ , как и в слое мелких, где интенсивность теплообмена обуславливается кондуктивной составляющей  $\alpha$ .

Получена формула

$$Nu_{max} = 0,21 Ar^{0,32} \quad (10)$$

для расчета максимальной интенсивности теплообмена в слое крупных частиц. Она справедлива для  $Ar = 1,4 \cdot 10^5 - 3 \cdot 10^8$ .

Эксперименты, в которых определялись коэффициенты теплоотдачи от поверхности в охлажденном запыленном воздухе, проводились при  $W_r = 1,25$  в области максимальной интенсивности теплообмена для среды без мелкодисперсных частиц.

На рис.6 показано влияние расходной концентрации на интенсивность теплообмена в слое алуновых частиц. Как видно, характер изменения  $\alpha$  зависит от диаметра частиц. Опыты с другими частицами выявили влияние плотности. Чем крупнее и

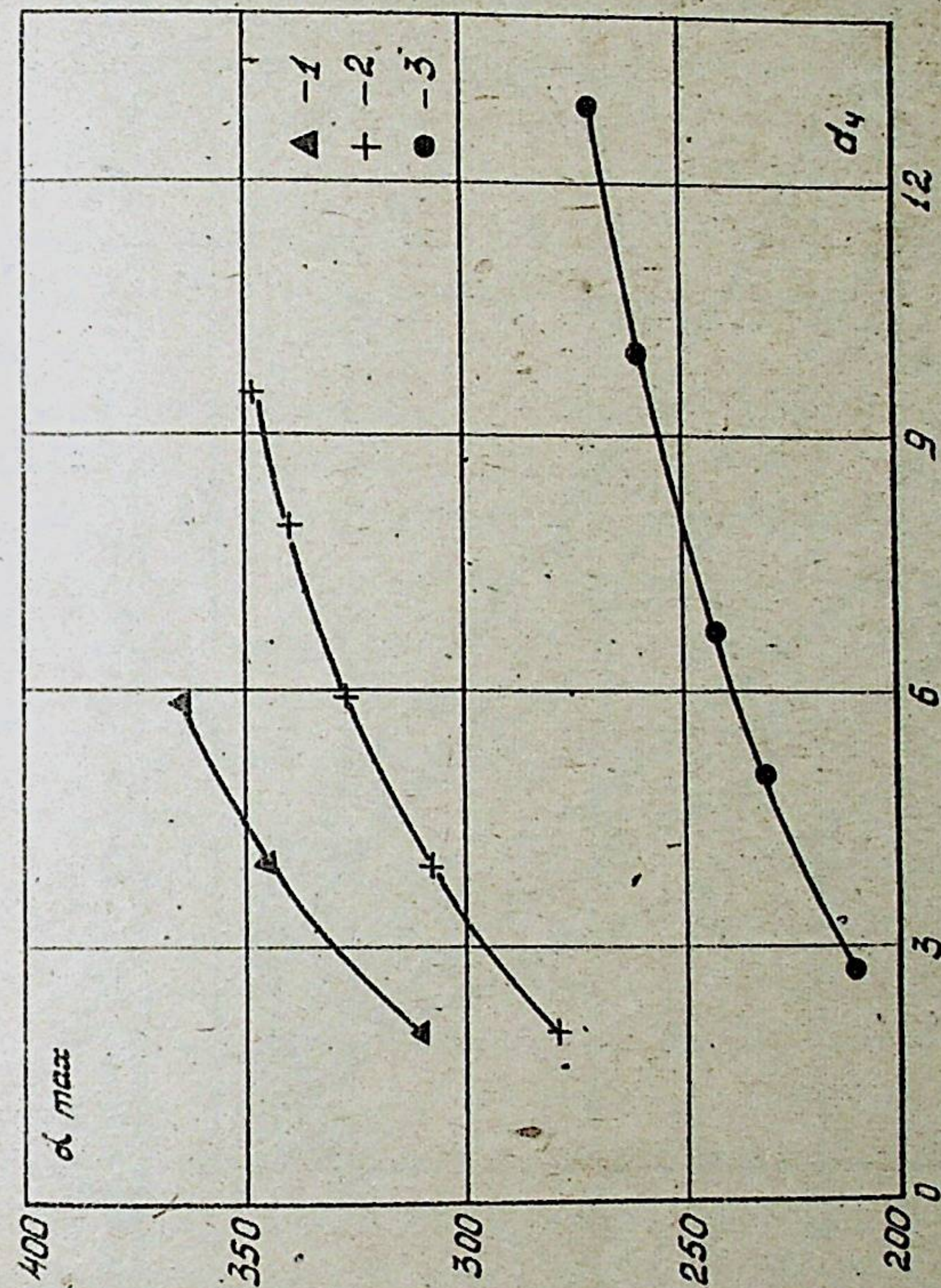


Рис. 5. Зависимость максимального коэффициента теплоотдачи от размера частиц (вертикальный цилиндрический зонд диаметром 40 мм).  $\alpha_{max}$ , Вт/м<sup>2</sup> C;  $d_p$ , мм. 1 - оцинкованные частицы; 2 - стальные частицы; 3 - алуновые частицы.

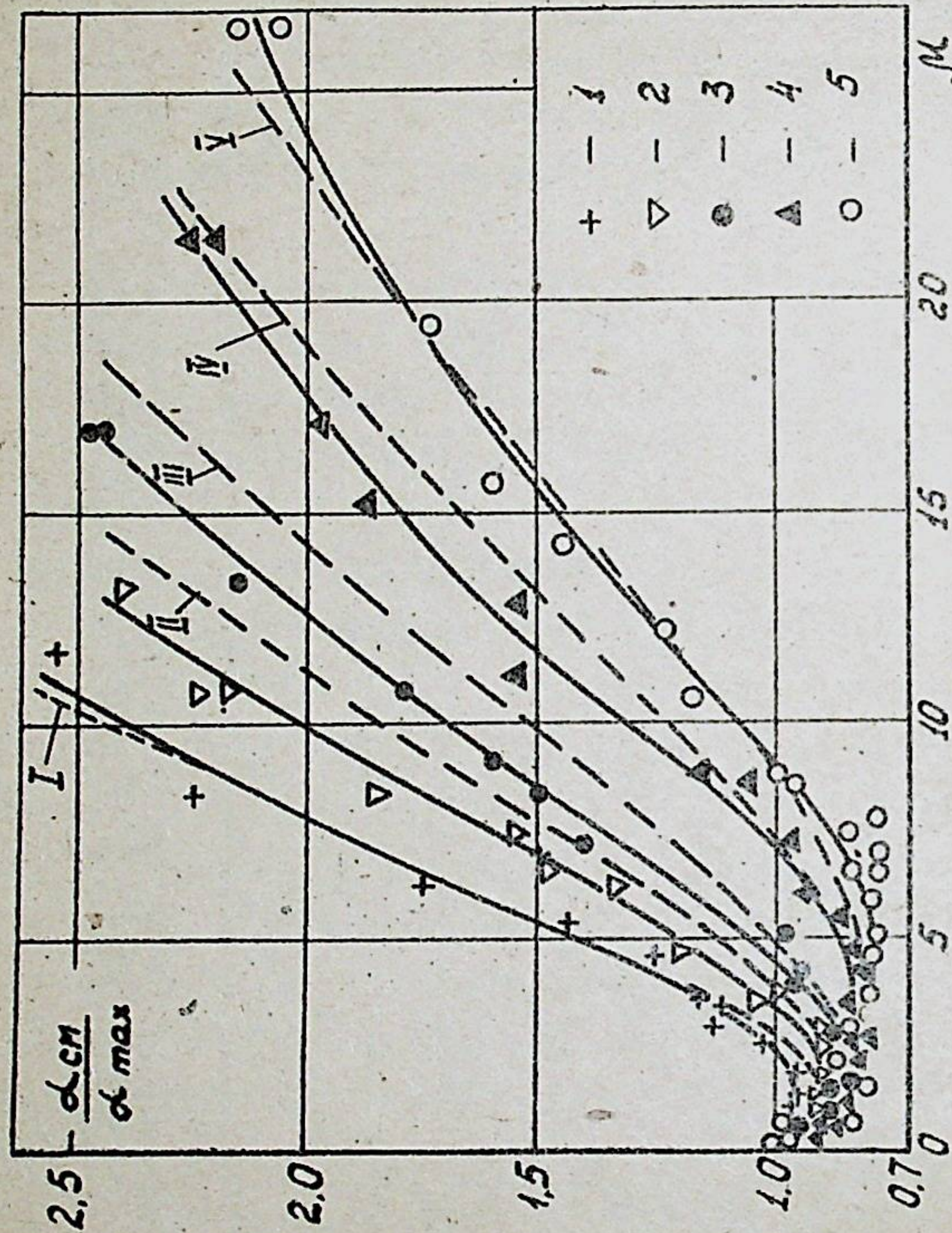


Рис.6. Влияние расходной концентрации твердого компонента в газозвеси на теплообмен в пескоожиженном слое алуносовых частиц (цилиндрический зонд диаметром 40 мм).  
 I -  $d_p = 2,7$  мм; 2 -  $d_p = 5$  мм; 3 -  $d_p = 6,7$  мм; 4 -  $d_p = 10$  мм; 5 -  $d_p = 12,92$  мм

тяжелее частицы, тем меньше влияет расходная концентрация на  $\alpha_{cm}$  и тем  $\alpha_{cm}$  меньше отличается от  $\alpha_{max}$ . Влияние диаметра датчика на теплообмен в запыленном слое не обнаружено.

Для алуносовых частиц, зависимость интенсивности теплообмена от концентрации, с точностью не хуже  $\pm 20\%$  аппроксимирующая опытные точки, может быть представлена в виде:

$$\frac{\alpha_{cm}}{\alpha_{max}} - 1 = 7,7 Ar^{-0,18} \mu^{0,9} - 3,2 Ar^{-0,1} \mu^{0,6} \quad (II)$$

Она справедлива для  $d_p = 2,7-12,92$  мм,  $Ar = 2,4 \cdot 10^6 - 2,2 \cdot 10^8$ ,  $\mu = 0-26,5$  кг/кг и  $\alpha_{cm}/\alpha_{max} \leq 2,5-2,6$ .

Как видно из рис.6 характер изменения коэффициента теплоотдачи один и тот же для всех частиц. Вначале, при малых концентрациях, интенсивность теплообмена несколько уменьшается по сравнению с незапыленным слоем. При больших концентрациях  $\alpha_{cm}$  существенно выше таковых в незапыленном слое. Такой характер изменения  $\alpha_{cm}$  от  $\mu$  можно объяснить соответствующим изменением действительных скоростей и концентраций вблизи поверхности теплообмена. Как было показано (см.рис.4 а,б), при увеличении  $\mu$  скорости у поверхности теплообмена падают, что в слое крупных частиц с преобладающим влиянием конвекция приводит к снижению  $\alpha$ . Но чем больше  $\mu$ , тем выше концентрация у стенки и тем больше непосредственное положительное влияние частичек пыли на теплообмен. При этом растет эффективная объемная теплоемкость потока газозвеси и увеличивается теплообмен с ударяющимися о поверхность частицами пыли, что приводит к росту коэффициентов теплоотдачи.

Пятая глава посвящена разработке установки для окончательной термической обработки фтористого алюминия, входящего в

состав электролита алюминиевой ванны. Известно, что фтористый алюминий практически не гигроскопичен, если он предварительно высушен до влажности менее 1%. Используемые у нас в стране способы сушки этого материала позволяют получить продукт (гидрат фтористого алюминия  $AlF_3 \cdot 0,5H_2O$ ) влажностью не менее 4-6%. Фтористый алюминий (средний размер частиц 75 мкм) становится негигроскопичным, если продукт влажностью 4-6% прокалить при температуре 600-650°C. При более высокой температуре происходят потери фтора из-за пиролиза.

В разработанной нами установке термобработка фтористого алюминия до влажности 1% и менее производится следующим образом. Горячими газами с температурой 1000°C прогревается слой крупных инертных частиц до температуры 650°C. Потом температура газов уменьшают до 625°C и под решетку этого слоя шнековыми питателями подают подлежащий обработке материал влажностью 4-6%. Проходя сквозь слой крупных инертных частиц, фтористый алюминий нагревается и теряет оставшуюся связанную влагу. При охлаждении слоя крупных частиц до 600°C подачу фтористого алюминия прекращают и цикл повторяют вновь.

Периодическая работа установки дает возможность:

интенсифицировать прогрев слоя крупных частиц в период регенерации за счет большой разности температур между слоем и охлаждающими его горячими газами, а также за счет больших скоростей фильтрации газов;

уменьшить период охлаждения слоя за счет большой эффективной теплоемкости газовой взвеси и большой суммарной поверхности крупных инертных частиц.

На холодной модели изучалось влияние концентрации фтористого алюминия на критическую скорость и качество псевдоожижения слоя крупных частиц. Опыты показали, что с точностью не меньше 20-25% данные, полученные для корундовой пыли, совпадают с данными, полученными для фтористого алюминия. Поэтому результаты реферлируемой работы были использованы для ориентировочного расчета установки для прокалывания фтористого алюминия. Основные параметры установки получились следующими:

производительность	- 25.000 т/год
псевдоожиженный слой инертных частиц	
диаметр	- 800 мм;
высота в неподвижном состоянии	- 600 мм;
диаметр частиц	- 13 мм;
концентрация фтористого алюминия во	
времени охлаждения слоя	- 2,7 кг/кг;
тепловой к.п.д.	- 30%.

### З а к л ю ч е н и е

1. В соответствии с поставленными задачами разработаны:
  - а) установка для исследования процессов в дисперсных системах;
  - б) методика определения действительных скоростей в слое без пыли;
  - в) методика определения скоростей газовой взвеси и концентраций мелкодисперсной пыли по сечению псевдоожиженного газовой взвеси слоя.
2. Экспериментально доказано, что качество псевдоожижения улучшается с добавлением мелкодисперсной пыли в охлаждающую

среде. При расходных концентрациях около 10-15 кг/кг слой становится практически однородным с довольно четко выраженной верхней границей.

3. Обнаружено, что увеличение расходной концентрации пыли в газозвеси приводит к значительному уменьшению скорости начала псевдоожижения. Получены критериальные зависимости для расчета коэффициента трения в запыленном слое и скорости начала псевдоожижения.

4. Установлено, что расширение запыленного слоя зависит не только от скорости фильтрации, но и от концентрации пыли. Получено уравнение, связывающее расширение слоя с параметрами частиц и двухфазного потока.

5. В незапыленном слое крупных частиц действительная скорость газа у вертикальной поверхности погруженного в него тела превышает таковую для основной части слоя на 40-75% в зависимости от размера частиц. Действительная скорость на расстоянии радиуса частицы от поверхности меньше средней по сечению. Несмотря на повышенную скорость газа у поверхности, средняя скорость на расстоянии от поверхности тела, равном одному, двум, трем и более диаметрам частиц, близка к скорости в центре слоя.

6. С добавлением пыли в оживающую среду увеличивается неравномерность ее распределения по сечению канала. Измерение локальных концентраций показало, что в пристенной зоне они могут превысить средние расходные в 2-9 раз. Перераспределение концентраций по сечению слоя приводит к перераспределению действительных скоростей оживающего агента.

7. Исследован внешний теплообмен в псевдоожиженном незапыленном слое. Подтверждено, что в случае крупных частиц увеличение их диаметра ведет к росту интенсивности теплообмена. Это объясняется соответствующим возрастанием конвективной составляющей суммарного коэффициента теплоотдачи. Получена критериальная зависимость для расчета интенсивности теплообмена в незапыленном слое крупных частиц.

8. Исследован внешний теплообмен в псевдоожиженном запыленном слое. С увеличением расходной концентрации мелкодисперсных частиц коэффициент теплоотдачи сначала уменьшается, а затем снова начинает возрастать. Такой характер изменения коэффициента теплоотдачи объясняется перераспределением действительных скоростей и концентраций по сечению псевдоожиженного слоя и в пристенной зоне. В результате обработки опытных данных получена зависимость для расчета интенсивности внешнего теплообмена в запыленном слое.

9. Показано, что для получения высококачественного фтористого алюминия перспективно использовать установки с псевдоожиженным слоем инертных крупных частиц, оживая их взвесью обрабатываемого материала. Результаты реферлируемой работы использованы для расчета схемы промышленной установки.

#### Обозначения

$d$  - диаметр, м;  $H$  - высота слоя, м;  $m_r$  - массовая скорость фильтрации, кг/м<sup>2</sup>.сек;  $v$  - действительная скорость потока, м/сек;  $w$  - скорость фильтрации, м/сек;  $W_r$  - число псевдоожижения, равное отношению скорости фильтрации газа или газозвеси к скорости начала псевдоожижения незапыленного слоя;  $X$  - относительное расстояние в диаметрах частиц слоя до

стенки экспериментального канала;  $\alpha$  - коэффициент теплоотдачи, Вт/м<sup>2</sup> °С;  $\varepsilon$  - порозность;  $\lambda$  - коэффициент теплопроводности, Вт/м.°С;  $\mu$  - средняя по сечению расходная массовая концентрация пыли в газозвеси, кг/кг;  $\nu$  - коэффициент кинематической вязкости, м<sup>2</sup>/сек;  $\xi$  - коэффициент трения;  $\rho$  - плотность, кг/м<sup>3</sup>.

И н д е к с ы:

"ч" - частицы слоя; "о", "ох", "о $\bar{x}$ " - относятся к неподвижному слою и характеризуют среднюю по сечению величину, локальную величину на расстоянии  $X$  от стенки экспериментального канала и усредненную по ширине датчика величину на расстоянии  $X$  от стенки канала; "г", "х", "х $\bar{x}$ " - то же, относятся к псевдооживленному незапыленному слою; "см", "смх", "см $\bar{x}$ " - то же, относятся к псевдооживленному запыленному слою; " " - относится к средней по сечению или объему величине; " ' " - относится к величине на пределе псевдооживления; "max" - максимальная величина в незапыленном слое; "з" - зонд.

Безразмерные величины:

$Ar = \frac{g d^3}{\nu^2} \cdot \frac{\rho_s - \rho_f}{\rho_f}$  - число Архимеда;

$Re = \frac{d_s w}{\nu_f}$  - число Рейнольдса;

$Nu = \frac{\alpha d_s}{\lambda_f}$  - число Нуссельта.

О проведенном исследовании доложено на:

I. IV Всесоюзном совещании по тепло- и массообмену в г. Минске в 1972 году;

2. IV Международном конгрессе ХИОА в г. Праге в 1972 году;
3. IV научно-технической конференции Уральского политехнического института им. С.М.Кирова в 1973 г.;
4. Научных семинарах по псевдооживленным и дисперсным системам Уральского политехнического института им. С.М.Кирова в 1970-1973 годах.

Основные результаты исследования опубликованы в следующих работах:

1. Маскаев В.К., Баскаков А.П. Особенности внешнего теплообмена в кипящем слое крупных частиц. ИФЖ, т.24, № 4, 1973, с. 589-593.
2. Носов В.С., Маскаев В.К. Вопросы гидродинамики слоя, псевдооживленного запыленным газом. ИФЖ, т.21, № 6, 1971, с. 1012-1016.
3. Носов В.С., Маскаев В.К., Горбунов Ю.В., Ширев Б.С. Особенности гидродинамики и теплообмена при псевдооживлении слоя крупных частиц и при поперечном обтекании цилиндра потоком газозвеси. В сб. "Тепло- и массообмен". Т.5, часть I. Киев, "Наукова думка", 1972, с. 82-86.
4. Баскаков А.П., Витт О.К., Филипповский Н.Ф., Киракосян В.А., Маскаев В.К. Основные закономерности тепло- и массообмена между поверхностью и псевдооживленным слоем. Сб. "Промышленные печи с кипящим слоем". Свердловск, изд. УПИ, 1973, с. 3-7.
5. Маскаев В.К. Об особенностях теплообмена между поверхностью и кипящим слоем крупных частиц. Тезисы IV научно-технической конференции Уральского политехнического института им. С.М.Кирова. Секция "Печи с кипящим слоем". Свердловск, Ротапринт УПИ, 1973, с. 14.

6. Маскаев В.К. Внешний теплообмен в охлажденном газо -  
взвесью кипящем слое. Тезисы IV научно-технической конференции  
Уральского политехнического института им. С.М.Кирова. Секция  
"Печи с кипящим слоем". Свердловск, Ротапринт УПИ, 1973, с.11.

7. Носов В.С., Маскаев В.К. Вопросы гидродинамики и внут-  
реннего теплообмена слоя крупных частиц, псевдоожиженного пы-  
легазовым потоком. Тезисы IV научно-технической конференции  
Уральского политехнического института им. С.М.Кирова. Секция  
"Тепло- и массообмен в дисперсных системах". Свердловск, Рота-  
принт УПИ, 1973, с.28-29.

НС 15721. Подписано к печати 13/IX 1973 г.

Объем 1,17 уч.-изд.л. Заказ 375. Тираж 130. Бесплатно.

Свердловск. Ротапринт УПИ.