

Б 30  
МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО  
ОБРАЗОВАНИЯ УССР

— 0 —  
ОДЕССКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
им. М. В. ЛОМОНОСОВА

---

Аспирант Р. А. БАХТИОЗИН

ИССЛЕДОВАНИЕ КОНВЕКТИВНОЙ ТЕПЛООТДАЧИ  
ДВУХФАЗНОГО ПОТОКА  
(ТВЕРДЫЕ ЧАСТИЦЫ — ГАЗ)  
В РАЗЛИЧНЫХ ВЕРТИКАЛЬНЫХ КАНАЛАХ

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научные руководители:  
д. т. н., профессор Гохштейн Д. П.,  
к. т. н., доцент Горбис З. Р.

г. Одесса  
1962 г.

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО  
ОБРАЗОВАНИЯ УССР

— 0 —

ОДЕССКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
им. М. В. ЛОМОНОСОВА

Аспирант Р. А. БАХТИОЗИН

ИССЛЕДОВАНИЕ КОНВЕКТИВНОЙ ТЕПЛОТДАЧИ  
ДВУХФАЗНОГО ПОТОКА  
(ТВЕРДЫЕ ЧАСТИЦЫ — ГАЗ)  
В РАЗЛИЧНЫХ ВЕРТИКАЛЬНЫХ КАНАЛАХ

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

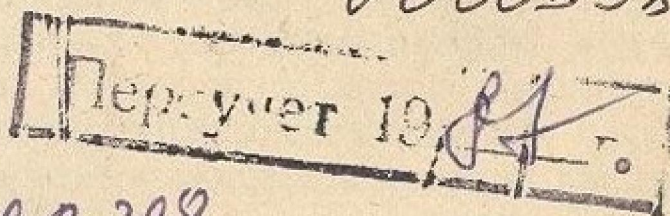
Научные руководители:  
д. т. н., профессор Гохштейн Д. П.,  
к. т. н., доцент Горбис З. Р.

ОНАХТ 06.04.11  
Исследование конвект

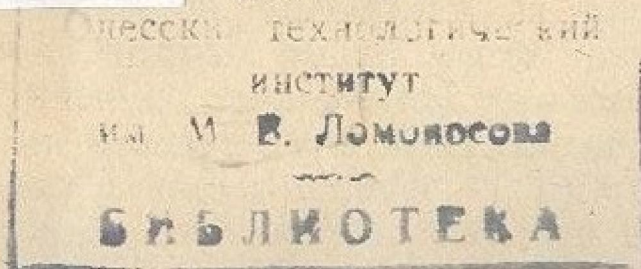


v000398

v000398



v.в.398



г. Одесса  
1962 г.

МОНІТОРИНГ НАУКОВО-ТЕХНІЧНОГО ПРОГРЕСУ  
ОБРАЗОВАНИЙ УМОВ

ОДЕСЬКИЙ ТЕХНОЛОГІЧЕСЬКИЙ ІНСТИТУТ  
ІМ. М. В. ЛОМОНОСОВА

МОНІТОРИНГ НАУКОВО-ТЕХНІЧНОГО ПРОГРЕСУ

Работа выполнена на кафедре теплотехники  
Одесского технологического института  
им. М. В. Ломоносова

Одесса  
1981

## I. Задачи исследования

Создание эффективных теплообменников, работающих с высокой интенсивностью, является одной из важнейших задач, которые определяют дальнейшее развитие теплоэнергетики. Одним из возможных методов интенсификации теплообмена является использование принципа «газовзвеси», который был предложен З. Ф. Чухановым в качестве высокоэффективного метода переноса тепла. Теплообмен двухфазных сквозных потоков «газ — твердые частицы» со стенкой имеет место при флюидном каталитическом процессе, в транспортных линиях и аппаратах для снятия излишков тепла, в электродном производстве, в химической промышленности, в промышленности строительных материалов. Возможно использование двухфазных сквозных потоков в качестве теплоносителей ряда энергетических установок. В принципе двухфазные потоки могут стать своеобразным рабочим телом, которое характеризуется необычайно высоким значением удельной теплоемкости.

Процесс теплоотдачи от двухфазного потока к поверхности нагрева является результатом сложного теплообмена. Здесь происходит теплоотдача тепла конвекцией от несущей фазы к тепловоспринимающей поверхности, конвективный теплообмен между твердыми частицами и газом, транспортирующим их, кондукция в твердых частицах и в пристенной газовой пленке. Кроме того, процесс теплоотдачи сопровождается весьма сложными аэродинамическими явлениями, отражая совместное влияние различных аэродинамических, теплофизических и геометрических факторов. Имеется значительное число работ по межфазовому теплообмену твердых частиц и газа. Аэродинамика двухфазных сквозных потоков также исследована в большой степени.

Однако для расчетов теплообменных аппаратов и различных процессов, в которых имеют место двухфазные потоки, необходимы данные по теплообмену газовзвеси со стенкой. В настоящее время в литературе известны лишь несколько работ, посвященных данному вопросу: У. Брэтца, И. У. Гиббу и К. Ж. Мюллера; А. Зелника; А. Фарбера и М. Ж. Марлея; Л. М. Мирзоевой; Д. У. Шлудберга, Р. Л. Уайтлау и Р. У. Карлсона. Во всех этих работах в основном исследовалось

влияние на теплоотдачу отдельных факторов. Так, Брэтц и др. исследовали влияние размера твердых частиц, Фарбер и Морлей — влияние скорости потока газозвеси и в некоторой мере концентрации, Мирзоева исследовала в основном влияние концентрации, Шлудерберг и др. при экспериментировании использовали только один размер частиц. Указанное обстоятельство объясняет отсутствие в настоящее время обобщенных зависимостей, отражающих влияние различных факторов (скорости потока, геометрических размеров каналов, размеров частиц, условий движения, концентрации и т. д.) и справедливых при изменении этих факторов в широких пределах. В литературе совершенно отсутствуют данные по теплоотдаче двухфазного потока со стенкой оребренных каналов и незначительны исследования теплообмена двухфазных потоков в каналах кольцевого сечения, а также при высоких концентрациях твердых частиц в газовом потоке.

Важность исследования теплообмена двухфазного потока с поверхностью нагрева, неполнота, а в ряде случаев и полное отсутствие литературных данных, определили основную задачу данного исследования: экспериментальное изучение теплоотдачи двухфазного потока в различных вертикальных каналах при различных режимах потока и установление соответствующих расчетных обобщенных зависимостей. Постановка и окончательная обработка результатов исследования проведены на базе основных положений теории подобия. Проведенный анализ литературных данных позволил определить, что при опытном исследовании теплообмена двухфазного потока может быть использовано общее критериальное уравнение стабилизированной и стационарной газозвеси, предложенное З. Р. Горбисом,

$$Nu_{II} = f(Re, Re_{\text{ч}}, \frac{D}{d_{\text{ч}}}, \frac{t_{\text{г}}}{t_{\text{ч}}}, \frac{C_{\text{г}}}{C_{\text{ч}}}, \beta, \frac{\rho_{\text{г}}}{\rho_{\text{ч}}}, \varphi), \quad (1)$$

- где  $Nu_{II}$  — критерий Нуссельта двухфазного потока;  
 $Re$  — критерий Рейнольдса газовой фазы;  
 $Re_{\text{ч}}$  — критерий Рейнольдса твердой фазы;  
 $D$  — эквивалентный диаметр канала, м;  
 $d_{\text{ч}}$  — эквивалентный диаметр твердой частицы, м;  
 $\rho_{\text{г}}, \rho_{\text{ч}}$  — плотность газа и частицы;  
 $t_{\text{г}}, t_{\text{ч}}$  — средняя температура газа и частицы, °С;  
 $C_{\text{г}}, C_{\text{ч}}$  — теплоемкость газа и частицы, ккал/кг °С;  
 $\beta$  — объемная концентрация;  
 $\varphi$  — коэффициент скольжения фаз;

$$\mu = \beta \frac{\rho_{\text{ч}}}{\rho_{\text{г}}} \varphi \text{ — весовая расходная концентрация, } \frac{\text{кг/час}}{\text{кг/час}}$$

Критериальное уравнение (1) учитывает критерий Рейнольдса твердой фазы, который определяется предельной относительной скоростью частиц  $v_{\text{ви}}$ . Так как в литературе нет общепринятых, учитывающих все факторы, зависимостей для определения  $v_{\text{ви}}$ , то возникла необходимость в экспериментальном изучении этой характеристики для частиц искусственного графита, использованных в опытах в качестве твердой фазы.

## II. Экспериментальное исследование скорости витания графитовых частиц

Опыты по определению скорости витания проводились на двух установках. Установлено, что определение аэродинамической характеристики двумя методами (по минимальной скорости уноса и по скорости витания) дает достаточно близкое совпадение результатов. Различаются в основном две области влияния размера частиц или, что то же, критерия Рейнольдса твердой фазы, на коэффициент лобового сопротивления. При значениях  $Re > 400$  — турбулентная область, а при значениях  $Re$  от 0,1 до 400 — переходная. В первой области с точностью  $\pm 10\%$   $C_f = 0,9 = \text{const}$ . Во второй области при  $30 < Re < 400$  установлена с точностью  $\pm 6\%$  зависимость (рис. 1) коэффициента лобового сопротивления графитовых частиц от числа Рейнольдса

$$C_f = 37,8 \cdot Re^{-0,6}_{\text{ч}} \quad (2)$$

Замечая, что

$$C_f = \frac{4}{3} A_r / Re^2_{\text{ч}} = Fe^3 / Re^2_{\text{ч}}, \quad (3)$$

получим зависимости:

$$\text{при } 1,4 \cdot 10^5 < Fe^3 < 2,7 \cdot 10^6, \quad Re_{\text{ч}} = 1,05 \cdot Fe^{1,5}, \quad (4)$$

$$\text{при } 5,3 \cdot 10^3 < Fe^3 < 1,4 \cdot 10^5, \quad Re_{\text{ч}} = 0,076 \cdot Fe^{2,14}, \quad (5)$$

которые позволяют однозначно, а не обычным путем последовательного приближения, определять в указанных пределах искомую величину — взвешивающую скорость для графитовых частиц, так как

$$v_{\text{ви}} = \frac{Re_{\text{ч}} \cdot \nu}{d_{\text{ч}}}$$

Указанным определениям предшествовала оценка дисперсного состава как графитового боя (смесь частиц), так и их фракций, проведенная с помощью лабораторной рассеивочной

машины РФ-1. Наряду с этим был определен удельный вес частиц в зависимости от размера фракций. Двадцатикратное увеличение при фотосъемках позволяет утверждать, что час-

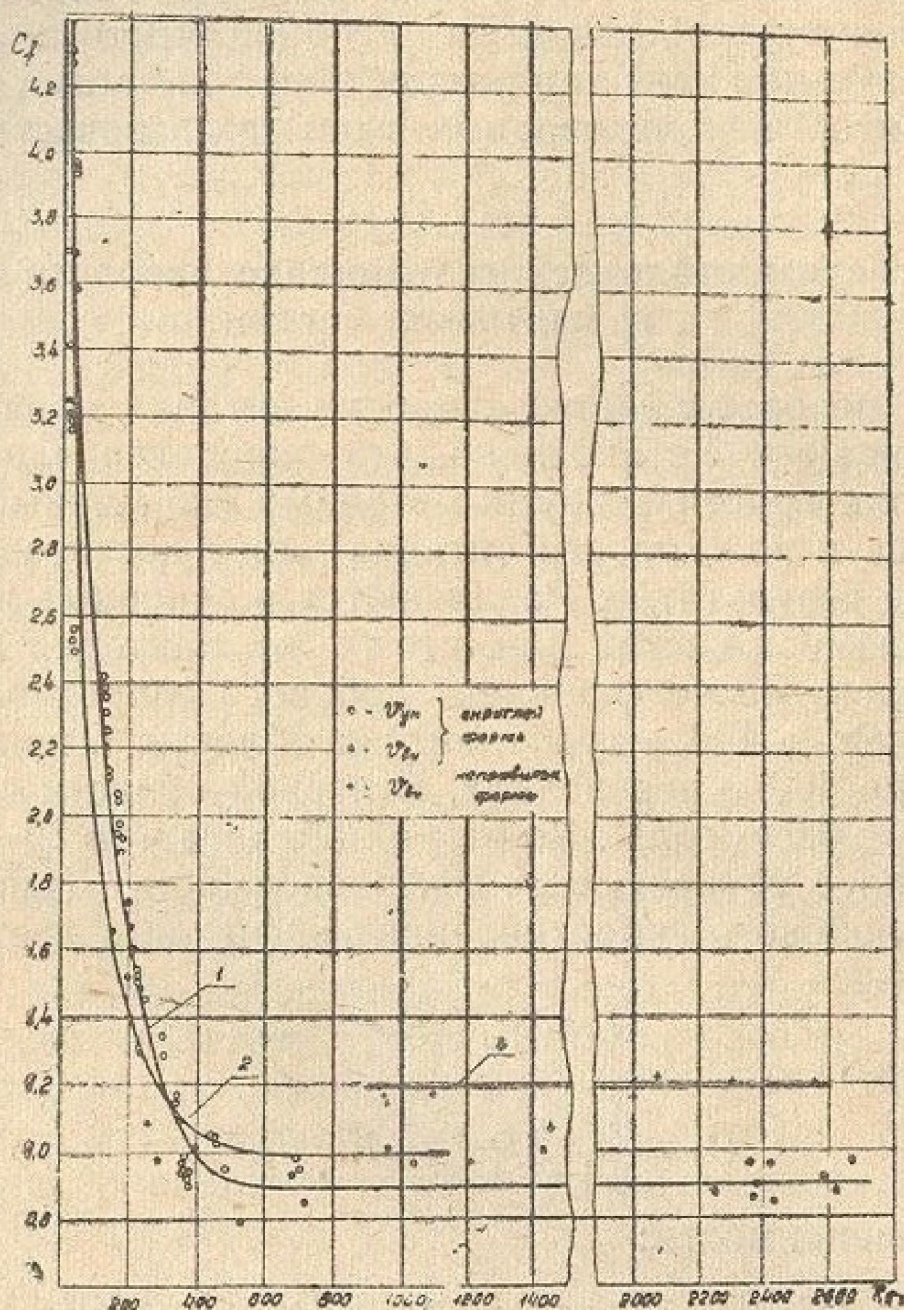


Рис. 1

Зависимость коэффициента лобового сопротивления от критерия Рейнольдса.

тицы (особенно крупные) имеют, как правило, округлую форму.

### III. Исследование теплоотдачи в неоребранных каналах круглого и кольцевого сечения

При исследовании теплоотдачи двухфазного потока принята следующая методика:

1. Теплоотдача изучается в вертикальных каналах при установившемся движении двухфазного потока (по контуру,

замкнутому для графитовых частиц и разомкнутому по газу) и при стационарном тепловом режиме.

2. Теплоотдача от газо-графитовой взвеси к стенке рассматривается как составная часть теплопередачи к воде, рассчитываемой непосредственно по опытным данным.

3. В соответствии с теоретическими положениями исследуется влияние основных определяющих факторов в широком диапазоне изменения их величин.

4. Оценка относительной интенсивности теплоотдачи газозвеси осуществляется по отношению  $\left(\frac{Nu_{п}}{Nu_{г}} - 1\right)$ , где  $Nu_{г}$  — критерий Нуссельта чисто газового потока.

4. Для выявления количественного влияния на интенсивность теплообмена основных определяющих факторов проверяется зависимость

$$\frac{Nu_{п}}{Nu_{г}} \cong 1 + m \frac{C_{ч}}{C_{г}} \cdot \mu^n, \quad (6)$$

где  $m = f(Re, Re_{ч}, \frac{D}{d_{ч}})$ .

Для проведения экспериментов были разработаны и последовательно использованы три экспериментальные установки. Основное различие между ними заключалось в конструкции теплообменных участков, узла питания и измерительных устройств. Исследование проводилось при охлаждении движущегося двухфазного потока.

Транспортирующей средой служил воздух, твердой фазой являлись частицы искусственного графита восьми фракций (от 0,14 до 2,08 мм). Исследовались каналы круглого сечения диаметром от 10 мм до 33 мм и кольцевого сечения эквивалентным диаметром от 10 мм до 67 мм. Помимо этого, исследовано пять типов каналов кольцевого сечения с продольно-ребренными стержнями. Все исследованные каналы расположены вертикально и характерны  $L/D \gg 50$ . Схема третьей экспериментальной установки представлена на рис. 2. Графитовые частицы из нижнего бункера поступают к шнековому питателю, которым подаются в камеру аэрации. Сжатый воздух от компрессора, пройдя ресивер и воздухоочистительное устройство, подводится в камеру под пористое днище. Газо-графитовая взвесь, полученная в камере аэрации, вытесняется в разгонный участок пульпопровода и поступает в электронагреватель. Далее нагретая взвесь, пройдя уравнивающий

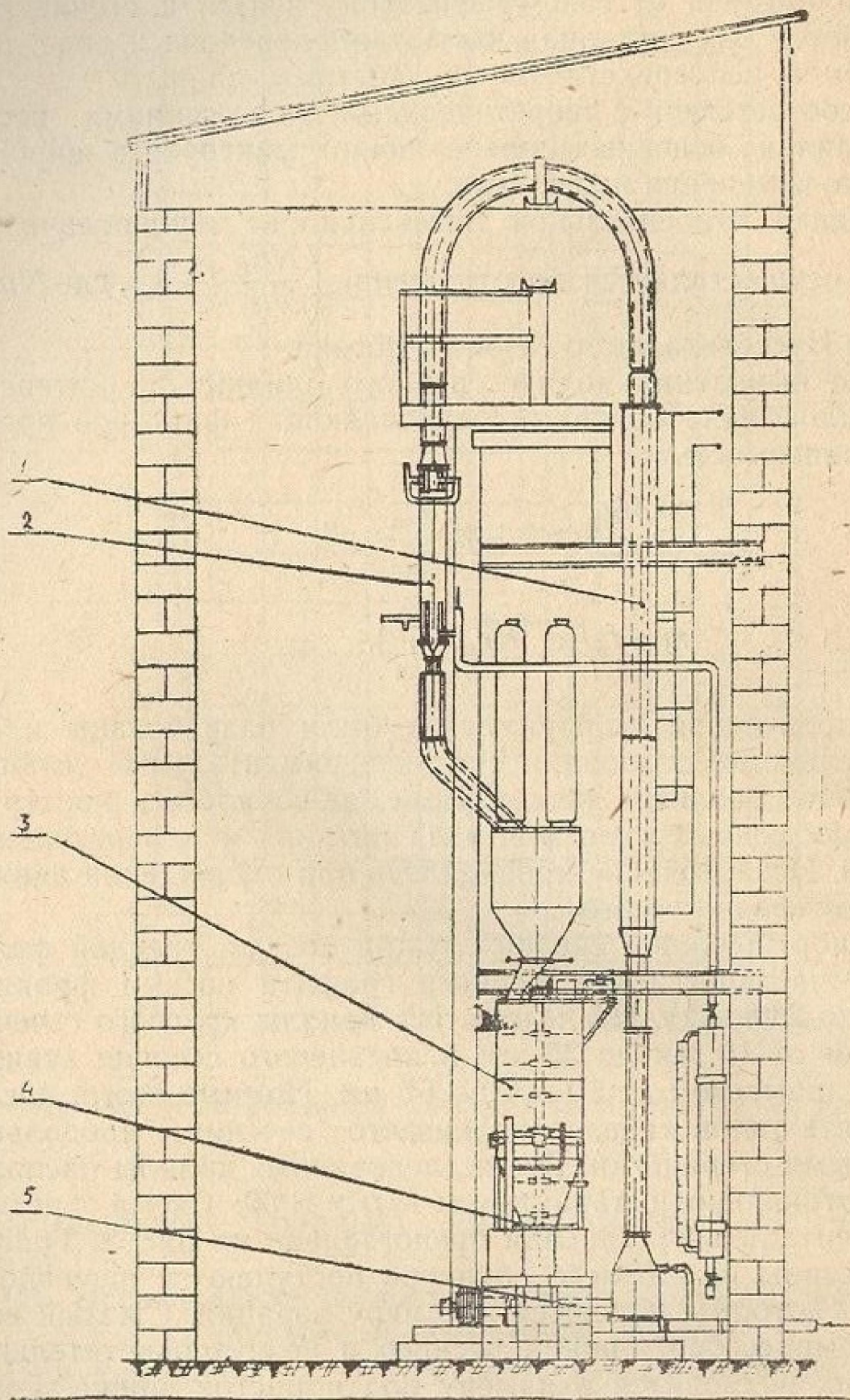


Рис. 2  
Экспериментальная установка.

участок, поступает в теплообменник, где она охлаждается, а затем поступает в бункер-отделитель. Здесь графитовые частицы выпадают в бункере, а воздух выбрасывается через матерчатые фильтры в атмосферу. Далее частицы графита поступают опять к шнековому питателю и повторяют вышеописанный цикл движения. Основным элементом установки является теплообменный участок, который выполнен сменным. На рис. 3 представлены два типа теплообменных участков с

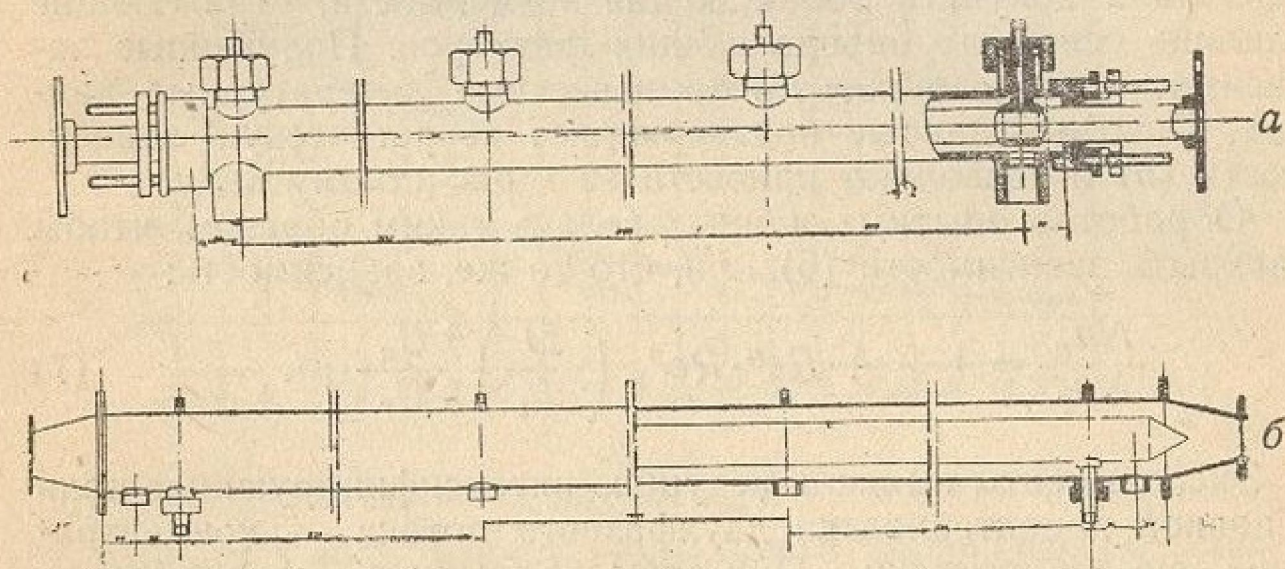


Рис. 3

Экспериментальные теплообменные участки  
 а — канал круглого сечения;      б — канал кольцевого сечения.

каналами круглого и кольцевого сечения. При проведении опытов скорость менялась от 2,1 м/сек до 44 м/сек, концентрация — от  $2 \frac{\text{кг/час}}{\text{кг/час}}$  до  $143 \frac{\text{кг/час}}{\text{кг/час}}$ . Температура охлаждающей воды измерялась лабораторными термометрами с ценой деления  $0,1^\circ\text{C}$ , температура газа и частиц измерялась отдельно хромель-алюмелевыми термопарами специальным прибором при  $d_{\text{ч}} > 0,4 \text{ мм}$  и гребенкой термопар при  $d_{\text{ч}} \leq 0,4 \text{ мм}$ , с точностью  $\pm 2 \div 3\%$ . Расход воздуха определялся по тарированной диафрагме, а расход графитовых частиц и охлаждающей воды — весовым способом с точностью  $\pm 2\%$ . Обработка опытных данных и их обобщение проводилось с помощью метода наименьших квадратов, что обеспечивало наиболее вероятную аппроксимацию опытных данных. Для проверки принятой методики измерений были проведены опыты по теплообмену с чистым воздухом во всех исследованных каналах. Ошибка по сравнению с известными критериальными зависимостями не превышала  $3 \div 5\%$ , что не выходит за пределы точности

этих формул. Данные по теплоотдаче чистого воздуха использовались также и для оценки относительной интенсивности теплоотдачи потока газозвеси.

Исследование теплоотдачи газо-графитового потока в вертикальных каналах круглого и кольцевого сечения проводилось на всех трех экспериментальных установках. Всего было проведено 229 опытов по теплоотдаче. Исследовано десять каналов круглого и кольцевого сечения. Результаты опытов позволили получить обобщающие зависимости, отражающие влияние основных определяющих факторов. Полученные зависимости охватывают также известные литературные данные. Опытные данные подтверждают теоретическую зависимость (5) и позволяют привести ее к расчетному виду.

Обработка опытных данных велась таким образом, чтобы раскрыть зависимости (6) или, что то же, зависимость:

$$\frac{Nu_{п}}{Nu_{г}} = 1 + A \cdot Re^n \cdot Re^{p_{ч}} \left( \frac{D}{d_{ч}} \right)^m \frac{C_{ч}}{C_{г}} \cdot \mu^{\kappa}. \quad (7)$$

Эксперименты выявили ведущую интенсифицирующую роль основной характеристики двухфазного потока — концентрации — на теплоотдачу. При этом достигнуто максимальное увеличение теплоотдачи газозвеси со стенкой канала в 20 раз по сравнению с чисто газовым потоком и установлено значение критической величины концентрации, являющейся верхней границей потока газозвеси. Обнаружены две области, в которых концентрация частиц в двухфазном потоке влияет на теплообмен различно. В первой области (область газозвеси) концентрация влияет в первой степени на интенсивность теплообмена и ограничена значением порядка 40. Во второй области (область флюидной взвеси) концентрация влияет на интенсивность теплоотдачи в степени, меньшей единицы. Она наступает при значениях  $\mu > 40$ .

Опытные данные и частные зависимости позволили выявить влияние других определяющих факторов на теплоотдачу.

С ростом скорости потока газозвеси в каналах круглого и кольцевого сечения относительная интенсивность теплообмена падает (рис. 4), это значит, что с увеличением скорости потока темп роста коэффициента теплоотдачи газозвеси со стенкой замедлен по сравнению с темпом роста коэффициента теплоотдачи чисто газового потока. Подобное явление также отмечалось Фарбером и сотрудниками. Оно может быть объяснено тем, что с увеличением скорости потока газозвеси снижается относительный интенсифицирующий эффект твердых

частиц, движущихся в газовом потоке, собственная турбулентность которого растет с увеличением скорости.

В каналах круглого сечения уменьшение размера частиц интенсифицирует теплообмен двухфазного потока. Подобное явление объясняется тем, что с уменьшением размера частиц

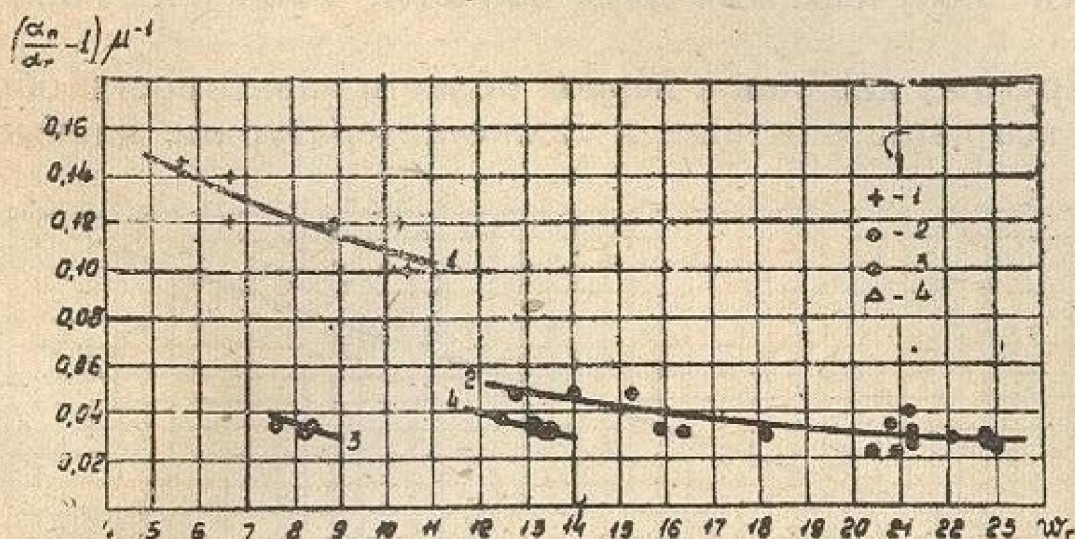


Рис. 4

Зависимость относительной интенсивности теплообмена от скорости.

увеличивается возможность радиального теплопереноса, улучшаются условия теплообмена между газовой и твердой фазами. Это также подтверждает выводы Брэтца и сотрудников. Обратное влияние размера частиц, обнаруженное Мирзоевой, может быть объяснено тем, что в условиях опыта наблюдалось комкование частиц и некоторое налипание на стенки теплообменника, которое Мирзоева объясняет влиянием статического электричества.

Влияние симплекса  $\frac{D_r}{d_q}$ , или геометрической стесненности движения, на интенсивность теплоотдачи сказывается различно на условия теплоотдачи в каналах круглого и кольцевого сечения при изменении  $\frac{D_r}{d_q}$  от 12 до 355. Так, в каналах круглого сечения влияние  $\frac{D_r}{d_q}$  не обнаружено. Это можно объяснить тем, что критерий Рейнольдса для газовой и твердой фаз, при данной методике обработки результатов, достаточно хорошо учитывает влияние изменений как диаметра канала, так и диаметра частиц.

В каналах кольцевого сечения увеличение стесненности движения частиц (уменьшение  $\frac{D_r}{d_q}$ ) сказывалось на интенсификации

фикации теплообмена отрицательно. По-видимому, в каналах кольцевого сечения, при внутреннем теплоотводе, центробежным усилиям легче увлечь к наружной, не участвующей в теплообмене поверхности более мелкие частицы.

Обобщающие зависимости по теплоотдаче газо-графитовой взвеси получены для двух областей влияния концентрации.

Для круглых каналов в первой области зависимость, обобщающая все наши опытные, а также литературные данные с

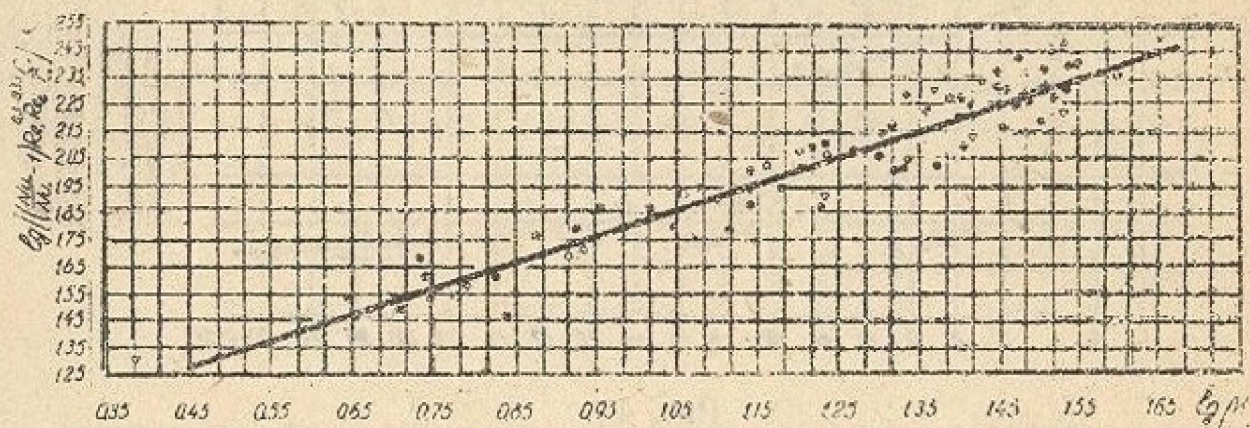


Рис. 5

Обобщающая зависимость для каналов круглого сечения ( $\mu < 40$ ).

вероятной погрешностью  $\pm 12\%$ , представлена на рис. 5 и имеет вид:

$$\frac{Nu_p}{Nu_r} = 1 + 6,7 Re_r^{-0,3} \cdot Re_q^{-0,33} \cdot \frac{C_q}{C_r} \cdot \mu. \quad (8)$$

Формула (8) справедлива в следующих пределах изменения определяющих факторов:

$$700 < Re_r < 65000; \quad 4,1 < Re_q < 783; \quad 0,73 < \frac{C_q}{C_r} < 1,12;$$

$$12 < \frac{D_r}{D_q} < 143; \quad 30 < t_{cp} < 130; \quad 2,5 < \mu < 45.$$

Для второй области зависимость представлена на рис. 6 и имеет вид:

$$\frac{Nu_p}{Nu_r} = 1 + 16,2 \cdot Re_r^{-0,3} \cdot Re_q^{-0,33} \cdot \frac{C_q}{C_r} \cdot \mu^{0,76}. \quad (9)$$

Формула (9) с точностью  $\pm 7\%$  справедлива в следующих пределах изменения определяющих факторов:

$$9000 < Re < 19200; \quad 4,1 < Re_q < 6; \quad 0,75 < \frac{C_q}{C_r} < 0,87;$$

$$121 < \frac{D}{d_q} < 143; \quad 30 < t_{cp} < 60; \quad 47 < \mu < 142.$$

С достаточной для практических расчетов точностью можно формулу (8) упростить, вводя взамен  $Re_{\text{ч}}$  и симплекса  $\frac{C_{\text{ч}}}{C_{\text{г}}}$  их средние значения.

Тогда формула (9) примет вид:

$$\frac{Nu_{\text{п}}}{Nu_{\text{г}}} = 1 + 1,2 \cdot Re^{-0,3}_{\text{г}} \cdot \mu^{0,76}. \quad (10)$$

Для кольцевых каналов в первой области значения концентрации (рис. 7) получена с точностью  $\pm 12\%$  следующая зависимость:

$$\frac{Nu_{\text{п}}}{Nu_{\text{г}}} = 1 + 0,37 \cdot Re^{-0,7}_{\text{г}} \cdot Re^{0,7}_{\text{ч}} \left( \frac{D_{\text{г}}}{d_{\text{ч}}} \right)^{0,6} \frac{C_{\text{ч}}}{C_{\text{г}}} \cdot \mu, \quad (11)$$

при  $6780 < Re_{\text{г}} < 26400$ ;  $5 < Re_{\text{ч}} < 450$ ;  $60 < \frac{D_{\text{г}}}{d_{\text{ч}}} < 355$ ;  $t_{\text{ср}} \approx 50^{\circ}\text{C}$ ;  
 $2 < \mu < 45$ .

Для второй области с точностью  $\pm 10\%$

$$\frac{Nu_{\text{п}}}{Nu_{\text{г}}} = 1 + 1,42 \cdot Re^{-0,7}_{\text{г}} \cdot Re^{0,7}_{\text{ч}} \left( \frac{D_{\text{г}}}{d_{\text{ч}}} \right)^{0,6} \frac{C_{\text{ч}}}{C_{\text{г}}} \cdot \mu^{0,6}, \quad (12)$$

при  $9000 < Re_{\text{г}} < 19300$ ;  $4,1 < Re_{\text{ч}} < 6$ ;  $0,75 < \frac{C_{\text{ч}}}{C_{\text{г}}} < 0,88$ ;  
 $328 < \frac{D_{\text{г}}}{d_{\text{ч}}} < 386$ ;  $t_{\text{ср}} \approx 50^{\circ}\text{C}$ ;  $46 < \mu < 143$ .

Упрощая зависимость (12), получим

$$\frac{Nu_{\text{п}}}{Nu_{\text{г}}} = 1 + 120 Re^{-0,7}_{\text{г}} \cdot \mu^{0,6}. \quad (13)$$

Анализ наших и литературных данных, а также частных и обобщающих зависимостей (8) ÷ (12) позволяет отметить следующее влияние основных определяющих факторов на теплообмен двухфазного потока:

**Влияние числа Рейнольдса.** С ростом  $Re_{\text{г}}$  относительная интенсификация теплоотдачи газозвеси падает. Это следует из выражений (8), (9) и формулы  $Nu_{\text{г}} = 0,14 \cdot Re^{0,6} \cdot \mu^{0,45}$ , полученной Фарбером и Морлеем. Выражение  $\frac{Nu_{\text{п}}}{Nu_{\text{г}}} = (1 + A \frac{C_{\text{ч}}}{C_{\text{г}}} \cdot \mu)^b$ , полученное Шлудербергом и сотрудниками для графитовой пыли с размером частиц в 1÷5 микрон, указы-

вадет на отсутствие влияния  $Re_r$  на интенсивность теплообмена, т. е. указывает на равное влияние числа Рейнольдса как запыленного, так и чисто газового потока. Такой результат, не наблюдаемый при использовании более крупных частиц, можно объяснить растущей однородностью двухфазного потока при  $d_{ч} \rightarrow 0$ .

**Влияние вида и параметров газовой фазы.** Опыты проведены с воздухом при атмосферном давлении. Переход к дру-

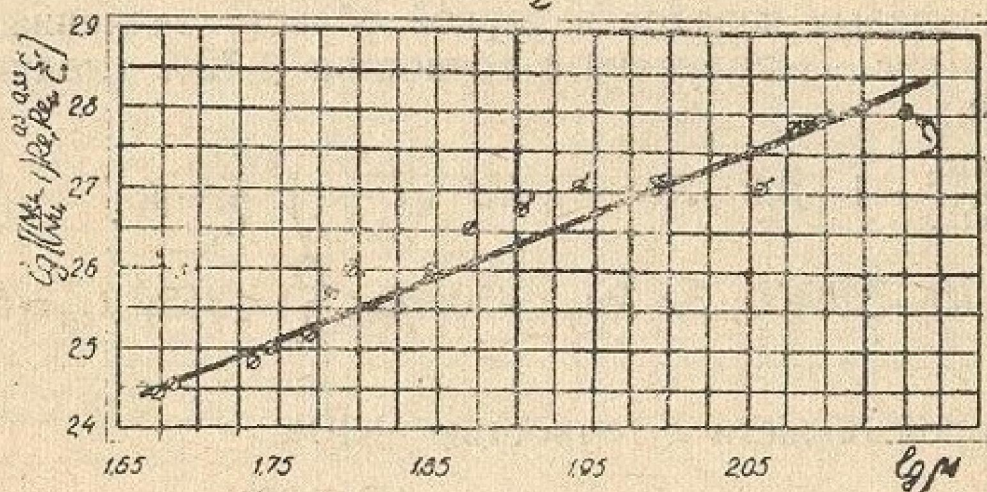


Рис. 6

Обобщающая зависимость для каналов круглого сечения ( $\mu > 40$ ).

гому газу может быть учтен критерием Прандтля, учитывающим характеристики газа, критериями Рейнольдса и симплексом  $\frac{C_g}{C_r}$ . Применение углекислоты, при прочих равных условиях, взамен воздуха несколько увеличит указанные вели-

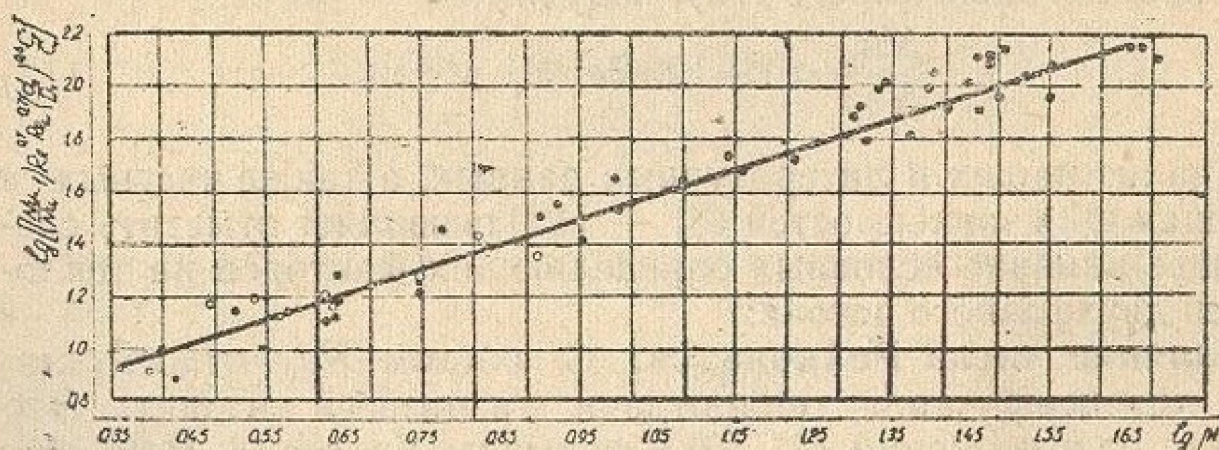


Рис. 7

Обобщающая зависимость для каналов кольцевого сечения ( $\mu < 40$ ).

ны, а применение гелия — уменьшит. Различие давления учитывается главным образом равенством критериев Рейнольдса в реальных и экспериментальных условиях.

**Влияние вида и параметра твердой фазы.** Физические характеристики частиц учитываются критерием Рейнольдса твердой фазы и симплексами  $\frac{C_{\text{ч}}}{C_{\text{г}}}$  и  $\frac{D}{d_{\text{ч}}}$ . Важно также значение критерия Био, определяющего скорость прогрева частиц. Наши и литературные опытные данные указывают на то, что вид использованного материала практически не влияет на теплоотдачу двухфазного потока, т. к. графит, кварцевый песок и алюмосиликат имеют близкие значения удельного веса и теплоемкости. Во всех случаях  $Bi < 0,2$ , что позволяет рассматривать контактный теплообмен как квазистационарный, для которого вид материала частиц несущественен.

#### IV. Исследование теплоотдачи в продольно-оребрённых каналах

Исследовались вертикальные, продольно-оребрённые каналы кольцевого сечения, размер частиц составлял 0,4 мм. Опыты проводились на второй и третьей экспериментальных установках. При проведении экспериментов определялось влияние на интенсивность теплоотдачи таких факторов, как концентрация, скорость потока и тип оребрения. Концентрация изменялась от 2 до 30  $\frac{\text{кг/час}}{\text{кг/час}}$ , скорость потока — от 3,8 до 8,6 м/сек, коэффициент оребрения — от 3,33 до 5,63. Исследовано пять типов оребренных каналов и проведено 108 опытов по теплообмену в продольно-оребрённых каналах. Оребрение было выполнено сплошными продольными ребрами из стали толщиной 1,5 мм. Приведенный коэффициент теплоотдачи определялся по зависимости.

$$\alpha_{\text{пр}} = \frac{\alpha_{\text{оп}} \cdot F_{\text{общ}}}{(E \cdot F_{\text{реб}} + F_{\text{осн}})} = \frac{\alpha_{\text{оп}}}{E_1}, \quad (14)$$

где  $\alpha_{\text{оп}}$  — коэффициент теплоотдачи взвеси, определенный из опыта на всю поверхность нагрева,  $\text{ккал/м}^2 \text{ } ^\circ\text{C} \text{ час}$ ;

$F_{\text{общ}}$  — полная поверхность нагрева,  $\text{м}^2$ ;

$F_{\text{реб}}$  — поверхность нагрева ребер,  $\text{м}^2$ ;

$F_{\text{осн}}$  — поверхность нагрева, свободная от ребер,  $\text{м}^2$ ;

$\psi$  — коэффициент, учитывающий неравномерность теплообмена по поверхностям из-за аэродинамических факторов;

$E$  — коэффициент эффективности ребер;

$E_1$  — средневзвешенная эффективность поверхности нагрева.

Тогда

$$Nu_{пр} = \frac{\alpha_{пр} \cdot D}{\lambda_{г}} = \frac{\alpha_{оп} \cdot D}{E_1 \cdot \lambda_{г}} \quad (15)$$

Опыты по теплообмену чистого воздуха в оребренных каналах дали обобщенную зависимость

$$Nu_{пр} = 0,021 Re^{0,8}, \quad (16)$$

которая хорошо согласуется с зависимостью, полученной О. А. Кремлевым, Н. В. Зозулей и А. А. Хивиным.

Исследование велось таким образом, чтобы раскрыть зависимость (7). Эксперименты выявили положительное влияние скорости на относительную интенсивность теплообмена в

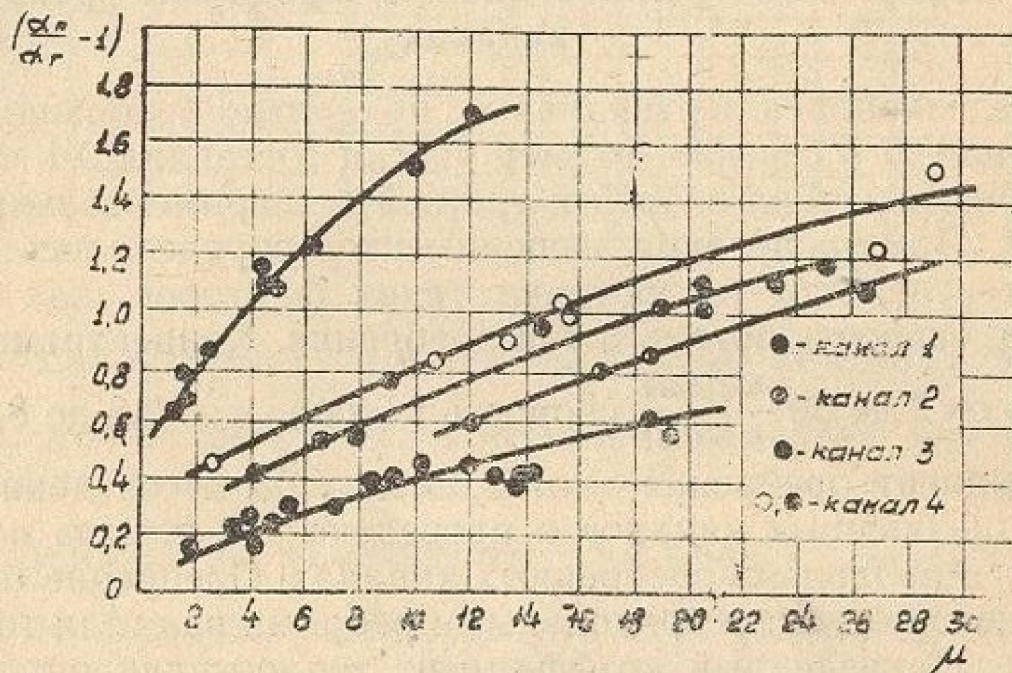


Рис. 8

Зависимость относительной интенсивности теплообмена от концентрации.

оребранных каналах, что по-видимому, объясняется выравниванием поля концентрации графитовых частиц при увеличении скорости. Влияние оребрения учитывалось симплексом

$\frac{D_{г}}{d_{ч}}$ , который достаточно хорошо учитывает как степень

оребрания, так и загромождение ребрами живого сечения канала. Эквивалентный термический диаметр  $D_{г}$  менялся от 44,6 мм до 80 мм. Результаты экспериментов показывают, что увеличение оребрения ухудшает теплоотдачу. Это объясняется тем, что с увеличением оребрения увеличивается аэродинамическое сопротивление у тепловоспринимающей поверхности, а это ведет к перераспределению частиц по сечению — их от-

теснению из теплообменной зоны. Влияние основной характеристики двухфазного потока — концентрации — также исследовано во всех четырех каналах. Рост концентрации вызывает увеличение интенсивности теплоотдачи, что иллюстрируется, например, рис. 8. Зависимость, обобщающая все полученные нами опытные данные (рис. 9) по теплоотдаче газо-графитового потока в продольно-оребранных каналах с точностью  $\pm 10\%$ , имеет вид:

$$\frac{Nu_{\text{п}}}{Nu_{\text{г}}} = 1 + 1,62 \cdot 10^{-10} \cdot Re_{\text{г}}^{1,5} \left( \frac{D_{\text{г}}}{d_{\text{ч}}} \right)^2 \frac{C_{\text{ч}}}{C_{\text{г}}} \cdot \mu^{0,47}. \quad (17)$$

Формула (17) справедлива в следующих пределах изменения определяющих факторов:

$$7350 < Re_{\text{г}} < 12100; 112,5 < \frac{D_{\text{г}}}{d_{\text{ч}}} < 200; 1,2 < \mu < 30;$$

$$0,76 < \frac{C_{\text{ч}}}{C_{\text{г}}} < 0,89; 44,6 < D_{\text{г}} < 80.$$

Показатель степени при концентрации равен 0,47, что меньше, чем показатели при  $\mu$  для гладких каналов. Это указывает на следующее важное обстоятельство: запыление газового по-

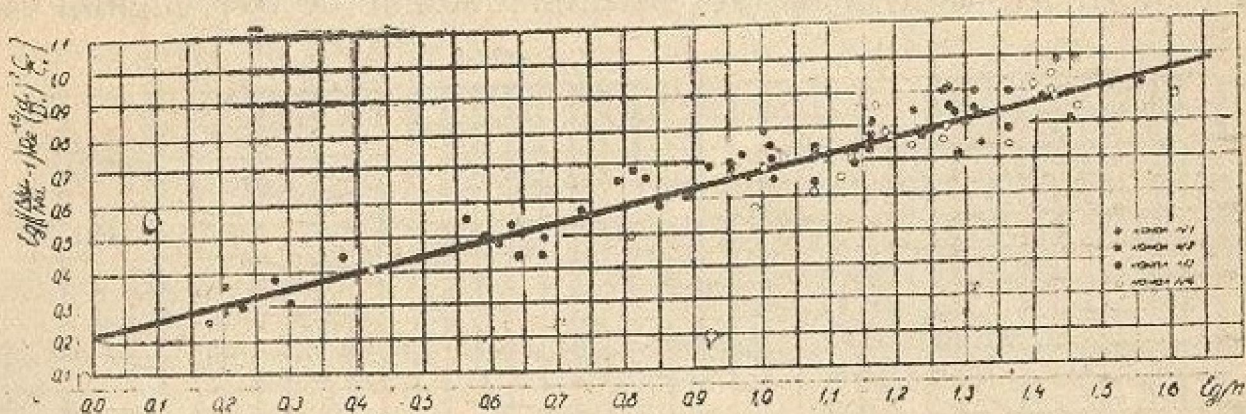


Рис. 9

Обобщающая зависимость для продольно-оребранных каналов.

тока твердыми частицами в условиях обтекания ребренной поверхности нагрева повышает относительную интенсивность теплоотдачи в меньшей степени, чем в условиях обтекания неоребранных каналов круглого и кольцевого сечения.

При наличии предполагаемого отеснения частиц от ребренной поверхности местные значения концентрации у кожуха должны быть выше, чем средние по сечению. Этим создаются условия для более интенсивного теплообмена между потоком и стенкой кожуха. В этих условиях ребренный стержень играет роль своеобразного турбулизатора.

Экспериментальная проверка вышеприведенного предположения осуществлена в так называемых коаксиальных теплообменниках (внешний и внутренний теплоотвод). При проведении эксперимента использованы частицы графита размером 0,165 мм; скорость менялась от 6,7 м/сек до 20,4 м/сек, концентрация — от 29 до 114  $\frac{\text{кг/час}}{\text{кг/час}}$ . Всего проведено 23 опыта. Аналогично кольцевым каналам, исследовано влияние концентрации на теплоотдачу в двух областях — при  $\mu < 45$  и при  $\mu > 45$ .

В результате обработки экспериментов по теплообмену получили с точностью  $\pm 11,5\%$  зависимость

$$\frac{Nu_{\Pi}}{Nu_{\Gamma}} = 1 + 0,299 \cdot \mu, \quad (18)$$

справедливую для следующего изменения определяющих факторов:

$$29 < \mu < 43,5; \quad \frac{C_{\Gamma}}{C_{\Pi}} \approx 1,30; \quad Re_{\Gamma} \approx 10000; \quad Re_{\Pi} \approx 5.$$

Сопоставление формул (18) и (8) показывает, что при прочих равных условиях интенсивность теплообмена при наличии турбулизатора выше, чем в гладких каналах, примерно на 45 : 50%. Это подтверждает предположение об оттеснении ча-

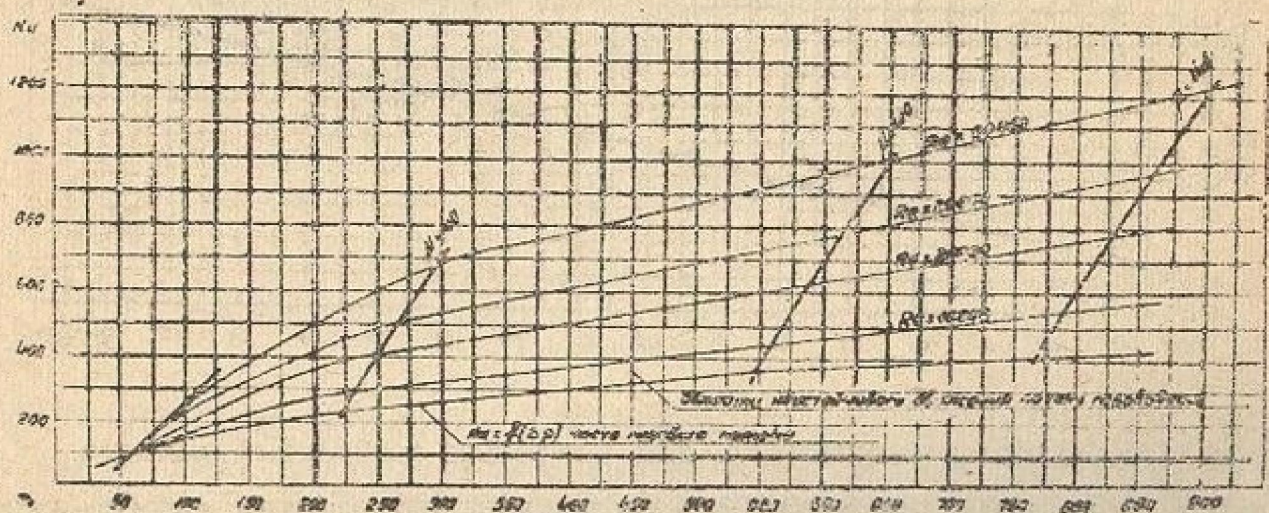


Рис. 10

Оценка энергетической характеристики потоков газозвеси.

стиц графита к кожуху, снижающую интенсивность теплообмена ребристой поверхности, но увеличивающую интенсивность теплообмена наружной стенки с потоком.

Полученные зависимости позволяют провести сравнительные расчеты затрат мощности на прокачку двухфазного пото-

ка по сравнению с чисто газовым потоком. Для оценки потерь напора газо-графитового потока, движущегося в вертикальных каналах, пользуемся обобщающей зависимостью, полученной А. М. Дзядзио. Результаты расчетов представлены на рис. 10. Из нее видно, что энергозатраты на прокачку газозвеси меньше затрат на транспорт чистого газа при всех значениях концентрации и чисел Рейнольдса газовой фазы. При прочих равных условиях энергозатраты на транспорт двухфазного потока тем меньше, чем выше концентрация и скорость газозвеси. Максимальное превышение значений критерия Нуссельта газозвеси над значениями Нуссельта чистого газа, при одинаковых затратах мощности на прокачку, достигает четырех.

## V. Основные выводы

1. Для оценки возможностей дисперсных теплоносителей и для расчета энергетических и технологических аппаратов с двухкомпонентными потоками типа газозвесь проведено экспериментальное исследование теплообмена в вертикальных каналах различных типов с изучением влияния основных факторов на процесс теплоотдачи.

2. Получены обобщенные расчетные зависимости для скорости витания частиц искусственного графита, которые позволяют однозначно, а не обычным путем последовательного приближения, определять взвешивающую скорость для графитовых частиц.

3. Установлено влияние на теплоотдачу весовой расходной концентрации, скорости двухфазного потока ( $Re_r$ ), геометрического размера частиц ( $Re_q$ ), геометрических размеров канала и условий стесненности движения ( $\frac{D_r}{d_q}$ ). Показано, что опытные данные по теплоотдаче подтверждают теоретические зависимости (1) и (6). Полученные данные позволили привести их к расчетному виду.

4. Впервые установлено численное значение критической величины концентрации, являющейся верхней границей теплоотдачи потока газозвеси ( $\mu_{кр} \approx 40 \frac{кг/час}{кг/час}$ ). Подтверждена правильность известных представлений о снижении интенсифицирующей роли твердых частиц в области флюидных взвесей, основанных на изменении механизма теплопереноса при  $\mu > \mu_{кр}$ .

5. Для каналов круглого сечения в двух областях влияния концентрации получены с точностью  $\pm 12\%$  обобщенные за-

висимости теплоотдачи газо-графитовой взвеси, охватывающие и литературные данные (частицы алюмосиликата, кварцевого песка).

Для каналов кольцевого сечения с точностью  $\pm 7 \div 12\%$  получены расчетные зависимости, обобщающие опытные данные при изменении геометрического размера канала в 6,3 раза, размера частиц в 15 раз, концентрации в 80 раз и скорости в 20 раз.

6. На основе исследования четырех типов продольно-оребранных каналов получена расчетная зависимость, которая с точностью  $\pm 10\%$  обобщает опытные данные при изменении коэффициента оребрения от 3,33 до 5,63 и изменении концентрации от 2 до  $30 \frac{\text{кг/час}}{\text{кг, час}}$ . При этом обнаружено, что запыление потока твердыми частицами повышает относительную интенсивность теплообмена в меньшей степени, чем в неоребранных каналах круглого и кольцевого сечения.

7. Исследование теплообмена двухфазного потока в коаксиальных каналах подтвердило предположение об оттеснении частиц графита к наружной неоребрной стенке в кольцевом продольно-оребрном канале. При этом возникает заметное увеличение коэффициента теплоотдачи со стенкой кожуха при наличии оребренного стержня, который играет роль своеобразного турбулизатора.

8. Высокая эффективность газо-графитового теплоносителя подтверждается расчетами энергетической характеристики типа  $Nu = f(\Delta p)$ . Так, например, значение  $Nu$  газозвеси, полученное при концентрации 40 и числе Рейнольдса 30000, более чем в два раза превышает значение  $Nu$  чисто газового потока, при одинаковых мощностях, затраченных на прокачку, и более, чем в четыре раза, при  $\mu = 140$  и  $Re = 50000$ .

9. Полученные в работе данные позволяют вести расчеты теплообменных аппаратов и устройств, в которых имеет место теплообмен с двухфазными потоками, твердая компонента которых является значительным источником интенсификации теплопереноса. Данные по аэродинамической характеристике графитовых частиц могут применяться в устройствах пневмотранспорта электродных заводов и других предприятий, использующих эти частицы. Установленные зависимости применяются при разработке ряда энергетических устройств, в которых дисперсный поток используется в качестве эффективного теплоносителя — например, в регенераторах, в парогенераторах и т. п.

**Основные результаты исследования  
опубликованы в следующих работах**

1. Бахтиозин Р. А., Горбис З. Р. «Экспериментальное исследование конвективной теплоотдачи запыленных потоков». Тезисы докладов совещания по тепло- и массообмену, Минск, 1961.
2. Календерьян В. А., Бахтиозин Р. А., Горбис З. Р. «Теплофизические и иные характеристики частиц искусственного графита». Тезисы докладов совещания по тепло- и массообмену, Минск, 1961.
3. Об аэродинамической характеристике графитовых частиц. Известия высших учебных заведений, Энергетика, № 11, 1961.
4. Исследование конвективной теплоотдачи газо-графитовой взвеси в условиях внутреннего обтекания вертикальных каналов. Атомная энергия, том 12, вып. 5, 1962.
5. О конвективной теплоотдаче потока газо-графитовой взвеси в продольно-ребреных каналах. Труды ОТИЛ, том XIV, 1962.

**Основные результаты работы докладывались автором**

1. На XXIV научной конференции ОТИ им. Ломоносова, Одесса, апрель 1961.
2. На Всесоюзном совещании по тепло- и массообмену, секция «Теплофизические характеристики различных материалов», Минск, июнь 1961.
3. На Всесоюзном совещании по тепло- и массообмену, секция «Общие вопросы теплообмена», Минск, июнь 1961.

— 0 —

Подписано к печати 22.XII.62 г. Формат бумаги 60×84/16.  
1,25 печ. л. 1,25 уч.изд. л. БР 04402. Зак. № 2902. Тираж 150.

Типография Одесского политехнического института  
г. Одесса, Ново-Аркадийская дор., № 5.