

Б
А 40

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО и СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
СССР
МОСКОВСКИЙ ордена ЛЕНИНА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ
ИНСТИТУТ

В.А. Курганов

На правах рукописи

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОТДАЧИ В ТРУБАХ К ПРОСТЫМ И
МНОГОАТОМНЫМ ГАЗАМ С ПЕРЕМЕННЫМИ СВОЙСТВАМИ

/01-053 - теплофизика/

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Москва - 1971

I. Введение

Проблема теплообмена в трубах при течении газов в условиях существенного изменения их физических свойств с температурой, возникшая в связи с широким применением в технике интенсивных тепловых процессов, в последние годы систематически исследуется теоретическими и экспериментальными методами. Несмотря на это, многие стороны проблемы изучены еще недостаточно. В частности, остается мало исследованным вопрос о том, какое влияние на закономерности теплообмена оказывают индивидуальные особенности газов, которые проявляются в характере температурной зависимости теплопроводности λ , вязкости η и теплоемкости C_p .

При ламинарном течении в трубах газа с переменными свойствами основным методом решения задач теплообмена является в настоящее время численное интегрирование уравнений переноса. Имеется ряд работ, в которых получены расчетные данные при различных начальных и граничных условиях. Однако, в большинстве случаев в качестве теплоносителя рассматривались одно- и двухатомные газы - воздух /В.Д. Виленский, Б.С. Петухов, Б.Е. Харин; К.Банкстон и Д.Макэлиот; П.Ворсе-Шмидт и Лепперт и др./ и гелий /Р.Дайсслер-А.Преслер; П.Ворсе-Шмидт/, близкие между собой по характеру температурной зависимости свойств; сведения об особенностях теплоотдачи к многоатомным газам получены только для CO_2 при развитом профиле скорости на входе в трубу /П.Ворсе-Шмидт/. Общий анализ вопроса о теплоотдаче при нагревании и охлаждении ламинарного потока со степенным характером изменения свойств

$$\frac{\rho}{\rho_0} = \left(\frac{T}{T_0}\right)^{n_p}; \quad \frac{\lambda}{\lambda_0} = \left(\frac{T}{T_0}\right)^{n_\lambda}; \quad \frac{\eta}{\eta_0} = \left(\frac{T}{T_0}\right)^{n_\eta}; \quad \frac{c_p}{c_{p0}} = \left(\frac{T}{T_0}\right)^{n_c} \quad /1/$$

проведен пока лишь для случая внешнего обтекания /плоская пластина/ в работе П.П. Швенянаса.

Следует отметить, что теоретические методы решения задач теплообмена в трубах в ряде случаев встречает известные трудности, обусловленные характером краевых условий. Одним из таких случаев является гидродинамический начальный участок трубы, особенно область малых приведенных длин. Здесь закономерности теплоотдачи окончательно еще не установлены даже при постоянных физических свойствах. Экспериментальных работ для этого случая, выполненных с газами, мало, и в них, по-существу, не затронут вопрос о влиянии переменности физических свойств. Поэтому накопление соответствующих опытных данных представляет несомненный интерес. Область малых приведенных длин трубы интересна также в практическом отношении в связи о существованием ламинарного течения в трубах с плавным входом и при $Re > Re_{кр}$.

При турбулентном течении газов в трубах влияние переменности их свойств также рассматривалось, в основном, применительно к одно- и двухатомным газам, незначительное различие между которыми приводит к эффектам второстепенного порядка и позволяет получить общие расчетные рекомендации.

К настоящему времени получен ряд теоретических решений /С.С. Кутателадзе; Б.С. Петухов и В.Н. Попов; К.Банкстон и Д.Макалиот/, в достаточной степени согласующихся с опытными данными, и выполнено большое количество измерений теплоотдачи при нагревании гелия, водорода, аргона, воздуха и азота, в которых охвачен широкий диапазон изменения параметров

процесса. Однако, во многих работах, несмотря на близкие первичные результаты, дается различная оценка относительного эффекта изменения свойств газа.

При обобщении опытных и расчетных данных по теплоотдаче в трубе к одному исследуемому газу /или группе подобных газов/ при турбулентном течении обычно используется зависимость

$$\frac{Nu_{ж}}{\epsilon_\ell Nu_{ож}} = F(\psi, \frac{x}{d}) \quad /2/$$

где $Nu_{ож}(Re_{ж}, Pr_{ж})$ - число Нуссельта для стабилизированного теплообмена при постоянных физических свойствах газа; ϵ_ℓ - поправка на входной участок при изотермическом течении, зависящая от условий входа в трубу;

$\psi = T_c/T_{ж}$ - температурный фактор. Числа подобия имеют обычный смысл и определены по диаметру трубы d и свойствам газа, отнесенным к температуре потока $T_{ж}$. По смыслу, $F(1, \frac{x}{d}) = 1$. Зависимость /2/ соответствует требованиям приближенного подобия рассматриваемых явлений и дает удовлетворительные с практической точки зрения результаты.

Вид функции $F(\psi, \frac{x}{d})$, однако, даже для одно- и двухатомных газов с близким характером поведения свойств установлен еще не окончательно. Одной из причин этого является использование разными авторами различных выражений для Nu_0 , которые отличаются друг от друга на 10 + 15%. К сожалению, в настоящее время отсутствуют достаточно точные экспериментальные данные по местной теплоотдаче к газам при малых температурных напорах $\psi \rightarrow 1$; достаточно большие расхождения дает здесь и теория. Поэтому значение Nu_0 многие авторы получают путем экстраполяции опытных данных, соответствующих достаточно

большим Δt , к значению $\psi = 1$. Результат такой экстраполяции существенно зависит от принятого вида функции $F(\psi, \frac{x}{d})$. В большинстве работ используется выражение:

$$F(\psi, \frac{x}{d}) = \psi^{-n} \quad /3/$$

Во многих обобщающих выражениях, например, в формулах ВТИ /В.Л. Лельчук с сотрудниками/, в формулах М.Тейлора учитывается зависимость n только от x/d ; многие авторы считают при этом, что при $x/d > 50-60$ значение n стабилизируется на уровне 0,5 - 0,7 и мало связано с характером изменения q_c по длине трубы. Однако, результаты измерений теплоотдачи при нагревании азота в широком диапазоне значений ψ , проведенные в МЭИ-ИВТАНе под руководством Б.С. Петухова и В.В. Кириллова, показали, что вид функции $F(\psi, x/d)$ связан с характером изменения q_c по длине трубы. При $q_c = Const$ в выражении /3/ n зависит не только от x/d , но и увеличивается также с ростом самого температурного фактора. В этой работе были выполнены также измерения теплоотдачи при малых Δt / $\psi \approx 1,06 + 1,13$ /; опытные данные обобщены формулой

$$Nu_{ж} = C Re_{ж}^{0,8} Pr_{ж}^{0,4} \psi^{-(a+b \lg \psi)} \quad /4/$$

где a и b зависят от x/d , значение C - от x/d и условий входа; при $x/d > 30$, $C = 0,0212$. Если q_c существенно возрастает по длине трубы, что наблюдается при непосредственном электрообогреве труб из тугоплавких металлов /Pt, Mo, W и др./, то зависимость $Nu_{ж}/Nu_{ож}$ от ψ уменьшается, "выпрямляясь" в логарифмических координатах. Вид зависимости $Nu_{ж}/Nu_{ож}$ от ψ , выражаемой формулой /4/, подтверждается также результатами теоретического анализа упомянутых выше авторов.

Из многоатомных газов в имеющихся исследованиях представлена лишь двуокись углерода CO_2 . Расчеты Дайсслера-Пресслера и немногочисленные опытные данные, наиболее полными из которых являются данные ВТИ, показали, что отличия в характере изменения λ , η и c_p у CO_2 по сравнению с простыми газами, обуславливают иной характер зависимости $Nu_{ж}$ от ψ . На основании своих опытных данных по теплоотдаче при нагревании аргона, воздуха и CO_2 В.Л. Лельчук и Г.И. Елфимов предложили единую обобщающую формулу, в которую для учета индивидуальных особенностей газа был включен "второй" температурный фактор $T_{ж}/T_{кр}$.

Анализ подобия процессов теплообмена в газах с переменными свойствами показывает, однако, что наряду с "вторым" температурным фактором, содержащим "физический" масштаб температуры / $T_{кр}$ или, например, постоянную Свизерленда, энергетический параметр потенциала Леннарда-Джонса и т.п./, необходимо вводить аргументы, связанные с теплоемкостью газа. Произвольное исключение этих аргументов может привести к существенным ошибкам. Например, формула ВТИ дает аномальные результаты для таких газов как He и H_2 ; из нее следует также, что даже в предельном случае постоянных свойств газа / $\psi = 1$ / число Нуссельта зависит от приведенной температуры газа $\frac{T}{T_{кр}}$, с чем, конечно, трудно согласиться.

Применительно к процессам теплообмена особенности поведения свойств газа наиболее определенным образом выражают показатели степени в соотношениях /1/, достаточно типичных для всех теплофизических свойств газов, включая λ и c_p .

Эти параметры достаточно консервативны по отношению к температуре. Учет же специфики газа на базе "второго" температурного фактора, строго говоря, не дает выигрыша в числе аргументов задачи, а лишь ограничивает конечный результат.

В настоящей работе предпринята попытка расширить объем экспериментальной информации о влиянии индивидуальных особенностей газов на теплоотдачу в круглой трубе при ламинарном и турбулентном режимах течения. С этой целью в качестве основного исследуемого вещества был выбран аммиак, применяемый во многих отраслях техники, который по поведению своих свойств существенно отличается от ранее изучавшихся газов.

При ламинарном режиме течения рассматривался процесс нагревания NH_3 при граничном условии $T_c = Const$ в короткой круглой трубе с плавным входом, т.е. в условиях относительно равномерного начального распределения параметров потока /гидродинамический начальный участок/.

При турбулентном режиме течения экспериментально исследовалась теплоотдача при нагревании аммиака и азота /граничное условие $q_c \cong Const$ / в достаточно длинной круглой трубе с предвключенным успокоительным участком. Влияние сжимаемости газа, по мере возможности, сводилось к минимуму. Эти условия соответствуют условиям опытов во многих других работах, что облегчает проведение сравнительного анализа полученных результатов.

2. Экспериментальная установка и рабочие участки

Ввиду склонности аммиака к необратимой диссоциации при повышенных температурах, опыты проводились на установке от-

крытого типа. Аммиак поступал в установку из стандартных баллонов в жидком виде. Система парогенерации, обладающая хорошей приемистостью, обеспечивала устойчивый расход газообразного аммиака от 0,2 до 23 кг/час. При работе с азотом установка питалась от баллонов со сжатым газом через редуктор; при этом для стабилизации расхода газа парогенераторы использовались в качестве ресиверов пониженного давления.

Расход газа измерялся ламинарно-целевым расходомером, в дросселирующем элементе которого предусмотрен отбор статических давлений на участке стабилизированного течения. Благодаря этому характеристика прибора является линейной при $Re < Re_{кр}$. Такой расходомер позволяет осуществлять практически равноточные измерения в широком диапазоне изменения расхода.

Перепад давлений в расходомере измерялся одновременно ртутным дифманометром типа ДТ-150 с улучшенной системой отсчета уровней и мембранным дифманометром ДМ-6 с показывающим прибором ЭПИД. Давление измерялось образцовым манометром класса 0,35, температура - медь-константановыми термопарами. Система измерения расхода тарировалась весовым способом непосредственно на аммиаке, количество которого измерялось путем растворения в воде.

Установка оборудована также устройствами для нагревания и охлаждения газа перед и за рабочим участком, необходимой регулирующей, запорной и аварийной арматурой, приборами электропитания и измерительной аппаратурой образцового и технического класса для контроля и регулирования рабочих параметров.

Измерение теплоотдачи при граничном условии производилось на рабочем участке № I, основным элементом ко-

торого является стальная трубка с внутренним диаметром $d = 12 + 0,01$ мм / 20°C /, толщиной стенки 3 мм и длиной 152 мм / $l/d = 12,7$ / . Для выравнивания параметров потока на входе в трубу предусмотрены входная камера /диаметр равен $\sim 3d$ / с тремя решетками и тонкостенное сопло, профиль которого образован дугами окружности. Трубка снабжена проволочным электронагревателем непрерывной намотки, который с помощью специальных токоподводов разделен на шесть регулируемых секций длиной по $\sim 2d$; каждая секция состоит из двух параллельно включенных ветвей. Постоянство температуры стенки опытной трубки, в пределах возможного, достигалось путем подбора необходимого распределения мощности по секциям нагревателя. При повышенных температурах секционированный электрообогрев по простоте реализации и качеству измерений имеет очевидные преимущества перед другими возможными способами подвода тепла при $T_c = \text{const}$. Качество измерения подводимых тепловых потоков было улучшено благодаря использованию постоянного тока для питания нагревателя и регулируемой компенсации тепловых потерь с помощью системы охранных нагревателей.

Измерения теплоотдачи при турбулентном течении газа производились на рабочих участках № 2 и № 3 с одинаковым принципом устройства и работы.

В участке № 2 опытная трубка имеет внутренний диаметр $d = 4,013 \pm 0,008$ мм, наружный диаметр $5,03 \pm 0,01$ мм; длина обогреваемой зоны трубки составляет $95d$, на входе оставлен необогреваемый участок длиной около $55d$. Обогрев трубки производился путем непосредственного пропускания по ее стенке

постоянного тока. Местные тепловыделения определялись по току и падениям напряжения на участках между потенциометрическими отводами. Указанный способ измерения полностью себя оправдал, потому что в процессе опытов сопротивление трубки вследствие интенсивного азотирования стенки аммиаком существенно увеличилось. Опытная трубка помещена в стальной кожух, предохраняющий ее от вредных механических усилий.

С помощью секционированных нагревателей на кожухе создавалось распределение температуры, близкое к распределению температуры на трубке; таким способом существенно снижались тепловые потери опытной трубки и ее тепловая инерция. Остаточные тепловые потери измерялись по разностям температур трубки и кожуха. Компенсация тепловых потерь позволила существенно улучшить качество измерения теплоотдачи при малых расходах газа и тепловых нагрузках.

Температура наружной поверхности трубки измерялась платинородий-платиновыми термопарами из проволоки диаметром 0,2 мм. Термопары приваривались контактным способом к тонким /0,13 мм/ стальным хомутам шириной 2 мм, изолированным от трубки слоем слюды толщиной 0,015 - 0,02 мм. Хомуты плотно фиксировались на трубке с помощью точечной сварки. Как показали расчеты, температура на средней линии хомута, где устанавливались термопары, практически равна соответствующей температуре наружной поверхности трубки при всех законах ее изменения, которые наблюдались в опытах. Термопары, установленные таким способом, надежно работали до температуры порядка 1100°C .

Температура газа измерялась на входе и на выходе опытной трубки термопарами, установленными в потоке. Входная термопа-

ра дублировалась тремя термопарами на успокоительном участке.

Ввиду того, что аммиак при повышенных температурах склонен к каталитической диссоциации, на входе и на выходе /за смесителем/ опытной трубки предусмотрен отбор проб газа на анализ.

Давление газа измерялось на концах рабочей трубки образцовыми манометрами класса 0,35.

Рабочий участок № 3 имеет трубку с наружным диаметром $3,99 \pm 0,01$ мм и внутренним $d = 3,003 \pm 0,006$ мм /при 20°C /; зона обогрева составляет $90d$, успокоительный участок - $45d$.

Э.д.с. термопар и разности потенциалов в рабочих участках № 1, 2 и 3 измерялись потенциометром Р 2/1 с делителем напряжения Р 5/1, а также цифровым вольтметром LM 1604 фирмы "Solartzon", имеющим примерно такой же класс точности, но значительно более удобным в эксплуатации.

Термопары были отградуированы совместно по образцовым пирометрам и поверенным уонтрольным образцам. Погрешность измерения температуры оценивается в $\pm 0,5^\circ$ при $t < 300^\circ\text{C}$ и, в среднем, $\pm 1,5^\circ$ при $t > 300^\circ\text{C}$.

Геометрические размеры рабочих участков, необходимые для определения параметров теплоотдачи, определялись с точностью порядка $0,2 + 0,5\%$.

3. Анализ и обобщение опытных данных по теплоотдаче к аммиаку на гидродинамическом начальном участке трубы

На рабочем участке № 1 было проведено в общей сложности около 85 основных опытов по теплоотдаче к аммиаку при граничном условии $T_c = \text{Const}$. Измерения проводились при давлении 1,5 - 2 атм и температурах газа на входе $T_{ж1}$ от 295°

до 524°K ; температура стенки T_c изменялась от 360 до 835°K , число Рейнольдса на входе Re_1 - от 1560 до 11000. Режим течения в пристеночном слое в большинстве опытов оставался ламинарным на всей длине опытной трубки; однако при $Re_1 > 4000$ на конце трубки уже ощущался рост теплоотдачи, связанный с переходом от ламинарного режима к турбулентному.

Обработка опытных данных производилась на ЭВМ. Местные и средние параметры теплоотдачи определялись на основании ступенчатой кривой полезной мощности секционированного нагревателя, полученной в опыте. В реальных условиях эксперимента на входе трубы, вследствие теплопроводности сопла, определенное "начало" процесса теплоотдачи отсутствует; при этом фактическая поверхность теплообмена увеличивается, а номинальное граничное условие $T_c = \text{Const}$ на некотором участке выполняется не строго. Поскольку параметры изучаемого процесса чувствительны к краевым условиям, опытные данные, чтобы придать им более общий характер, необходимо привести к стандартным условиям развития процесса в соответствии с моделью гидродинамического начального участка. Легче всего это сделать, располагая данными о профилях скорости и температуры в потоке, однако, такие сведения, по условиям измерений, отсутствовали. Специальные численные решения задачи по методике ИВТАН показали, что опытные данные для сечений, достаточно удаленных от входа, можно привести к стандартным условиям приближенно, если значения коэффициентов теплоотдачи определять по номинальной температуре стенки и эквивалентному расстоянию от входа $X_э$, которое определяется равенством:

$$\pi d \int_0^{X_э} q_c^э dx = Q_{подв} = \bar{q}_c \pi d X_э \quad /5/$$

где $Q_{подв}$ - количество тепла, подведенное к газу на рассматриваемом участке трубы /оно известно из опыта/; $q_c^э$ - искомое распределение $q_c(x)$ при стандартных краевых условиях. Вид этой функции устанавливается по опытным данным методом последовательных приближений; в первом приближении можно положить $q_c^э \sim x_э^{-0,5}$.

Средние коэффициенты теплоотдачи вычислялись на основании /5/ с использованием начального $\Delta T_0 (\alpha^0, \bar{Nu}^0)$ и средне-логарифмического $\Delta T^0 (\alpha^0, \bar{Nu}^0)$ температурных напоров.

Для облегчения обработки опытных данных эквивалентные расстояния от входа $x_э$ определялись путем прибавления к координате, отсчитанной от начала обогрева, постоянной поправки $\Delta x_э$, средняя величина которой, по оценкам, составляла в условиях проведенных опытов $\sim 0,33d$. Индекс "э" у этих величин в дальнейшем изложении будет опущен. Анализ влияния различных побочных факторов, которые могли повлиять на результаты измерений, показал, что в большинстве опытов эффектами, связанными с естественной конвекцией и диссоциацией газа, можно пренебречь. В ряде случаев были существенными лучистые потери с концов опытной трубки; для их учета вычислены соответствующие поправки. Изучение воспроизводимости теплового режима опытной трубки показало, что возможность достаточно надежного измерения местной теплоотдачи в использованной конструкции рабочего участка существует только при $x/d > 4$.

Погрешность определения зависимости $\alpha(x)$ и $\alpha(x)$ с учетом ошибки отнесения /т.е. ошибки определения $x_э$ / и воспроизводимости результатов оценивается на уровне 5,4% /до 10% при $x/d = 2$ / для средней теплоотдачи и 10-12% для местной.

Средняя теплоотдача. Обобщение опытных данных по средней теплоотдаче, представляющей при граничном условии I рода основной интерес, производилось на базе зависимостей

$$\bar{Nu}_i^0 / \bar{Nu}_{0i}^0 = F_1(\psi_1) \quad \text{и} \quad \bar{Nu}_{жx}^0 / \bar{Nu}_{0жx}^0 = F_2(\psi) \quad /6/$$

где $\psi_1 = T_c / T_{ж1}$, и $\psi = T_c / T_{ж}$, где $T_{ж} = 0,5(T_{ж1} + T_{жx})$; физические параметры в числах подобия выбираются при начальной $T_{ж1}$ и средней температуре газа в трубе $T_{ж}$, что является удобным для теплотехнических расчетов.

На основании литературных данных, для \bar{Nu}_i^0 при ламинарном течении в первом приближении было принято выражение:

$$\bar{Nu}_{0x}^0 = C Re_x^{0,5} Pr^{1/3} \quad /7/$$

В числах с индексом "x" в качестве характерного размера используется длина /эквивалентная/ рассматриваемого участка трубы. При $Re_{ix} < 75000$ опытные точки с разбросом порядка $\pm 5\%$ можно обобщить зависимостями

$$\bar{Nu}_{ix}^0 = 0,791 Re_{ix}^{0,5} Pr^{1/3} \psi_1^{0,3} \quad \text{и} \quad \bar{Nu}_{жx}^0 = 0,791 Re_{жx}^{0,5} Pr^{1/3} \psi^{0,23} \quad /8/$$

При $Re_{ix} > 75000$ закономерности теплоотдачи меняют свой характер в результате начавшегося изменения режима течения газа.

Более внимательный анализ опытных данных, соответствующих ламинарному режиму течения, показал, что при малых приведенных длинах $\tilde{x}_{R1} < 10^{-3}$ ($\tilde{x}_R = \frac{1}{Re} \cdot \frac{x}{d}$) лучшие результаты дает формула

$$\bar{Nu}_i^0 = (0,67 + 0,2 \tilde{x}_{R1}^{0,1}) \tilde{x}_{R1}^{-0,5} Pr^{1/3} \psi_1^{0,3} \quad /9/$$

Это связано с тем, что при $\tilde{x}_R \rightarrow 0$ теплоотдача в трубе снижается до уровня теплоотдачи на пластине. В литературе часто

употребляется определение среднего числа Нуссельта по средне-
 логарифмическому напору ΔT^n . В этом случае опытные точки
 с разбросом порядка $\pm 5\%$ обобщаются зависимостью:

$$\overline{Nu}_x^n = \left[3,66 + \frac{0,0735}{\tilde{X}_{R,ж}^{1,33} + 0,1 Pr_{ж}^{0,17} \tilde{X}_{R,ж}^{0,5}} \right] \psi^{0,23} \quad /10/$$

При $\psi = 1$ формула /10/ аналогична формуле Стефана, но дает
 несколько большие значения \overline{Nu}^n .

Формулы /8/ - /10/ экспериментально проверены в диапа-
 зоне $2 \cdot 10^{-4} \leq \tilde{X}_{R1} \leq 10^{-2}$; экстраполяцию можно допустить
 только до $(\tilde{X}_{R1})_{max} = 1,5 \cdot 10^{-2}$; при этом, если $Re_1 > Re_{кр}$,
 должно выполняться условие $Re_{1x} \leq 75000$. Поправки на темпе-
 ратурный фактор пригодны только для аммиака NH_3 в состоя-
 нии, удаленном от насыщения /практически, при $p \leq 10$ атм,
 $T_{ж1} = T_s(p) + 40 + 50^\circ$ /.

Местная теплоотдача. Измерение местной теплоотдачи,
 вследствие ряда методических трудностей, было произведено
 только в сечениях $x/d \geq 4$. При ламинарном режиме течения га-
 за /по предварительным данным, это было связано с условием
 $Re_{1x} \leq 35000$ /, опытные данные с разбросом порядка $\pm 10\%$
 обобщены уравнением:

$$Nu_{1x}^0 = 0,4 Re_{1x}^{0,5} Pr_{ж1}^{1/3} \psi_1^{0,38} \quad /11/$$

Число Нуссельта определено, как и в /8/ - /9/, по начальному
 напору $\Delta T_0 = T_c - T_{ж1}$, а физические свойства по температуре
 газа на входе $T_{ж1}$.

Более существенная зависимость местных чисел Нуссельта
 от температурного фактора по сравнению со средними /8/ гово-
 рит о том, что влияние температурного фактора на местную
 теплоотдачу при ламинарном течении вообще не постоянно и
 увеличивается с ростом приведенной длины, так что учесть

это влияние степенной поправки с постоянным показателем сте-
 пени можно лишь приближенно в ограниченном диапазоне \tilde{X}_R .

Данные, на основании которых была получена формула /11/,
 соответствуют значениям \tilde{X}_{R1} от $7 \cdot 10^{-4}$ до $7 \cdot 10^{-3} / 8 \cdot 10^{-4} <$
 $< \tilde{X}_{R1} < 8 \cdot 10^{-3}$, $\tilde{X}_p = \frac{1}{pe} \cdot \frac{x}{d}$ /, т.е. достаточно узкому диапазону.

Сравнение всех опытных данных по местной теплоотдаче с форму-
 лой /11/ показало, что при $Re_{1x} > 40000$ местная теплоотдача
 меняет свой характер вследствие турбулизации течения. Коли-
 чественную оценку местной теплоотдачи к аммиаку в интервале
 $4 \cdot 10^4 \leq Re_{1x} \leq 10^5$ можно провести по формуле:

$$Nu_{1x}^0 = 0,023 Re_{1x}^{0,8} Pr_{ж1}^{1/3} \psi_1^{0,38} \quad /12/$$

При $Re_{1x} > 10^5$ происходит еще более резкое увеличение чисел
 Нуссельта, обусловленное полной турбулизацией потока. Следу-
 ет подчеркнуть, что характер и размеры переходной зоны /на
 кривой Nu_x от Re_x / существенно зависят от условий входа в
 трубу, поэтому указанные границы и формула /12/ могут приме-
 няться только для труб с плавно очерченным соплом и успокои-
 тельной камерой достаточно большого диаметра на входе.

Обсуждение результатов. Эмпирические зависимости /8/
 + /11/ можно сравнить с литературными данными пока только
 в предельном случае $\psi = 1$. Сравнение показывает, что форму-
 лы /9/ и /10/ дают более высокие значения чисел Нуссельта,
 чем у других авторов, однако это расхождение в целом нахо-
 дится в пределах точности имеющегося расчетного и эксперимен-
 тального материала по этому вопросу. Например, с расчетными
 данными Стефана разница составляет 6-8%, с данными Кейса
 $0,5 \pm 4\%$; с данными Сукомела и Величко, полученными по ре-
 зультатам измерения местной теплоотдачи, $\sim 2 \pm 7,5\%$.

Закономерности теплоотдачи при ламинарном течении газа с переменными свойствами на гидродинамическом начальном участке трубы экспериментально исследовались, по-существу, впервые. Обнаруженные особенности теплоотдачи при нагревании аммиака говорят о том, что в рассматриваемой области течения увеличение теплопроводности газа в пристеночной области подавляет эффекты, обусловленные ослаблением конвективного переноса у стенки за счет снижения плотности газа и увеличения его вязкости. Аналогичное явление обнаружено позднее в расчетных работах ИВТАН при нагревании воздуха, однако влияние температурного фактора в этом случае значительно слабее /см. рис. I/. Это указывает на существенную роль индивидуальных особенностей газа в рассматриваемом процессе.

По методике ИВТАН был проведен численный расчет местной теплоотдачи к аммиаку при $T_c = Const$ и следующих условиях: $T_{ж1} = 373,2^\circ K$, $p = 1,5$ атм, $Re_1 = 2500$, $\psi_1 = 1,0001; 1,05; 1,2; 2,0$. Как показал расчет, влияние температурного фактора на местное относительное число Нуссельта Nu_1^o / Nu_{o1}^o хорошо учитывает степенная поправка ψ^n , однако n увеличивается с ростом приведенной длины \tilde{X}_{p1} . На рис. I показано относительное влияние температурного фактора при ламинарном течении на среднюю и местную теплоотдачу к аммиаку и воздуху при $\psi_1 = 2$. Кривые 3 и 4 показывают, что формула /II/ в интервале $8 \cdot 10^{-4} < \tilde{X}_{p1} < 8 \cdot 10^{-3}$ дает среднее значение поправки на температурный фактор, полученной из расчета, расхождения не превышают $\pm 5\%$, что, конечно, трудно уловить при погрешности измерений порядка $\pm 10\%$. Судя по кривой 2, значения $\bar{Nu}_1^o / \bar{Nu}_{o1}^o$, полученные

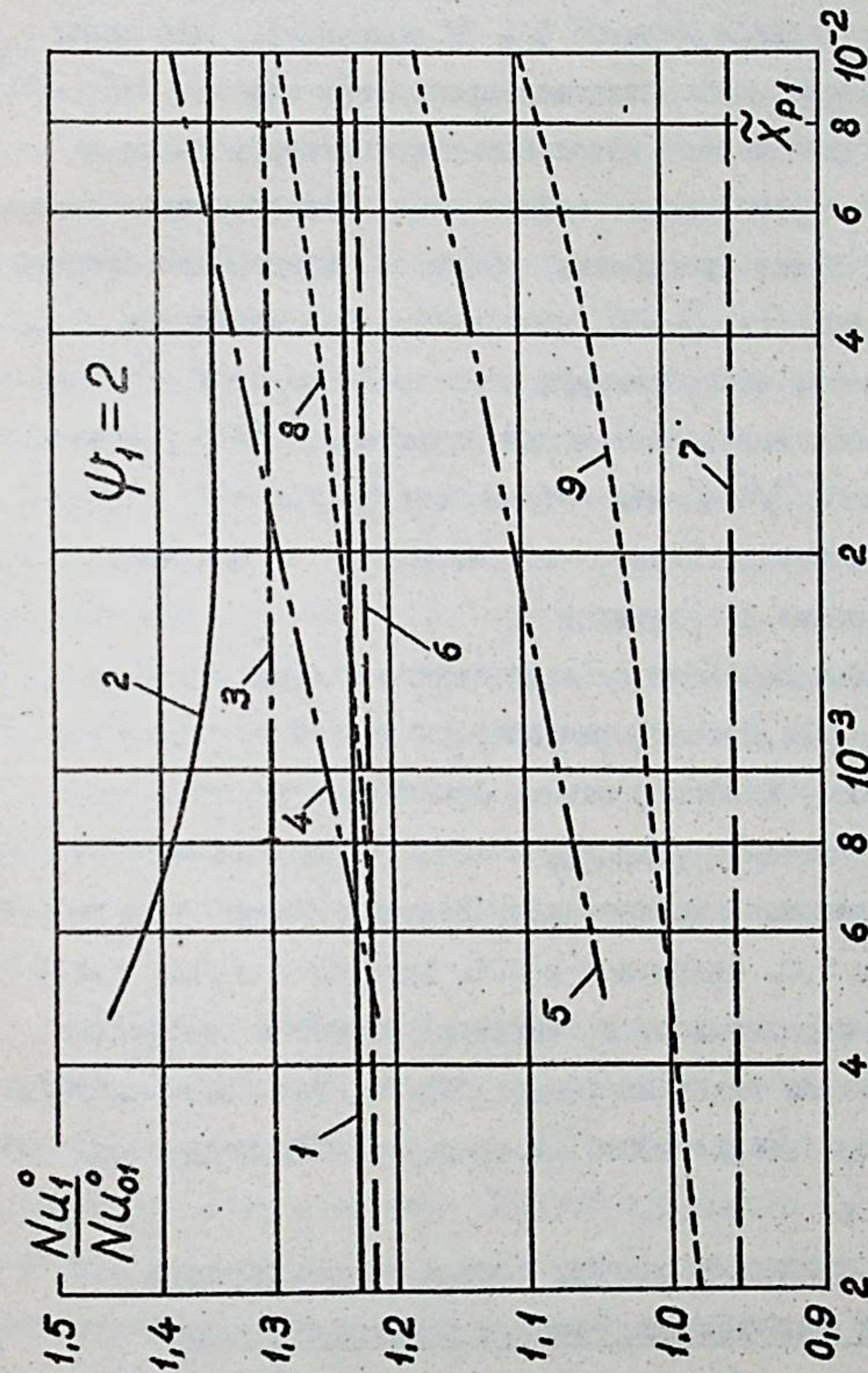


рис. I. Средняя теплоотдача в трубе, аммиак: 1 - по формуле /I/; 2 - расчет. Местная теплоотдача в трубе: 3 - аммиак, по формуле /II/; 4 - аммиак, расчет; 5 - воздух, расчет. Продольно обтекаемая пластина: 6 - аммиак, 7 - воздух.

по результатам расчета, при $\tilde{\chi}_{p1} < 10^{-2}$ еще не являются надежными. Сравнение относительных чисел Нуссельта в трубе и на пластине, вычисленных в последнем случае по формулам из работы П.П. Швенянаса /кривые 6 и 7/ показывает, что теплоотдача на пластине может являться предельным случаем теплоотдачи на гидродинамическом начальном участке трубы также в смысле влияния переменности свойств газа. Это обстоятельство дает повод к попытке преодолеть трудности определения средней теплоотдачи в области $\tilde{\chi}_R \rightarrow 0$, возникающие при численном методе решения задачи, аппроксимируя относительное число Нуссельта в этой области зависимостью для пластины. Пример расчета таким способом $\overline{Nu}_1^0 / \overline{Nu}_0^0$ для NH_3 и воздуха при $\psi_1 = 2$ представлен кривыми 8 и 9. Видно, что указанная аппроксимация дает правдоподобные результаты.

Границы зоны перехода от ламинарного к турбулентному течению и поведение местной теплоотдачи в этой области, полученные в работе, близки к данным Сукомела и Величко, где также получено значение $(Re_{1x})_{кр} = 40000$; в других работах указываются более высокие значения. В этих работах /Е.П. Дыбан и Э.Я. Эпик; С.С. Филимонов и Б.А. Хрусталева и др./ значение $(Re_x)_{кр}$ определялось по минимуму местного коэффициента теплоотдачи. Как видно из формул /II/ и /I2/, этот минимум находится при $Re_{1x} > 40000$, т.е. внутри переходной области.

4. Анализ и обобщение опытных данных по теплоотдаче к газам при турбулентном течении в круглой трубе

Опыты по измерению теплоотдачи при нагревании аммиака NH_3 проводились при числах Рейнольдса на входе Re_1 от $8 \cdot 10^3$ до $2,4 \cdot 10^5$, начальной температуре газа $t_{ж1}$ от 20 до

$150^\circ C$, температуре стенки до $920^\circ C$. Плотность теплового потока на стенке q_c составляла от $1,1 \cdot 10^4$ до $1,5 \cdot 10^6$ вт/м²; ее изменение по длине трубы на участке $x/d > 20$ не превышало 20%. Число Маха в большинстве опытов было меньше 0,3, достигая лишь в отдельных случаях 0,6. Однако даже при $M = 0,6$ влияние сжимаемости на параметры потока было незначительным, так как у NH_3 число Прандтля близко к единице, а разность $C_p - C_v$ относительно мала.

Всего на аммиаке было проведено около 76 опытов. Тепловой баланс в большинстве случаев сходился с точностью до 3%.

В целях проверки методики исследования, использованной в основных опытах, было проведено также контрольное измерение теплоотдачи к азоту N_2 при температуре газа на входе $\sim 20^\circ C$. В этих опытах число Re_1 изменялось от $3 \cdot 10^4$ до $5 \cdot 10^5$ вт/м², t_c - до $913^\circ C$. Температурный фактор $\psi = T_c / T_{ж}^0$ в проведенных опытах составлял от 1,04 до 2,4. В случае NH_3 близость кривой насыщения и склонность газа к каталитическому разложению значительно сузили доступный диапазон изменения этого параметра.

Местные коэффициенты теплоотдачи в контрольных сечениях трубки определялись по местной разности температур $T_c - T_{ж}^0$, где T_c - температура стенки, $T_{ж}^0$ - среднемассовая температура торможения газа в сечении. При $M > 0,4$ вместо $T_{ж}^0$ подставлялась температура стенки $T_{ас}$. Значения T_c определялись по результатам измерения температуры наружной поверхности трубки с учетом перепада температур в стенке, который рассчитывался по известному соотношению. Следует заметить, что вследствие азотирования трубки аммиаком при $t_c > 400^\circ C$ эффективное термичес-

кое сопротивление стенки увеличивается, по данным специальных измерений - до 2-х раз. Это могло привести в отдельных случаях к некоторому занижению величин α , но не более, чем на 1,5 - 2%.

Температура торможения газа в сечении определялась по энтальпии. При этом давление в сечении находилось линейной интерполяцией давлений на входе и на выходе трубы. При $M > 0,4$ значения T_{ac} и термодинамической температуры $T_{ж}$ определялись по одномерной газодинамической модели течения.

В ряде опытов, где температура стенки превышала 650-700°C, при измерении состава газа отмечена термическая диссоциация аммиака. Анализ влияние диссоциации NH_3 на результаты измерений показал, что вклад химической реакции в суммарную интенсивность местной теплоотдачи в последних, наиболее нагретых сечениях опытной трубки может оказаться существенным даже в тех случаях, когда тепловой эффект реакции слабо отражается на тепловом балансе рабочего участка. Для изучения конвективной теплоотдачи использовались данные, полученные в тех сечениях, где рассчитанная степень диссоциации ξ не превышала 0,5%. Эффекты, связанные с химической реакцией, приблизительно учитывались по специально разработанной методике.

Максимальную погрешность измерения коэффициентов теплоотдачи в проведенных опытах можно оценить в 5 + 7% при $\Delta T = 35 + 50^\circ C$ и в 3-4,5% при значительных температурных напорах.

Обобщение полученных данных для каждого из исследован-

ных газов производилось в соответствии с зависимостью /2/. Свойства газа выбирались при температуре $T_{ж}$ /термодинамической/.

Зависимость $Nu_{ож}(Re_{ж}, Pr_{ж})$ была выбрана на основании измерений теплоотдачи, проведенных при малых температурных напорах. Анализ данных, полученных на аммиаке / $1 < Pr < 0,85$ / и азоте / $Pr \cong 0,71$ / при $\Delta T = 30 + 50^\circ C$ / $1,06 \leq \psi \leq 1,15$ / и приведенных к изотермическим условиям /см. ниже/, показал, что при $Re > 10^4$ в области стабилизированного теплообмена /практически, в сечениях $x/d \geq 30$, где x - расстояние от начала обогрева/ теоретическая зависимость Б.С. Петухова и В.Н. Попова лучше отражает закономерности теплоотдачи при $0,7 < Pr < 1$, чем, например, известные степенные зависимости, однако опытные точки располагаются в среднем на ~ 5% выше значений, вычисленных по этой формуле. Это обстоятельство связано, по-видимому, с тем, что допущение о равенстве турбулентного числа Прандтля единице, использованное при теоретическом анализе, для газов является не вполне удовлетворительным. В дальнейшем значения $Nu_{ож}$ в зависимости от $Re_{ж}$ и $Pr_{ж}$ определялись по формуле Петухова-Попова с поправочным коэффициентом 1,05:

$$Nu = \frac{1,05 \frac{\xi}{8} Re Pr}{k_1(\xi) + k_2(Pr) \sqrt{\frac{\xi}{8}} (Pr^{2/3} - 1)} \quad /13/$$

где

$$k_1(\xi) = 1 + 3,4\xi$$

$$k_2(Pr) = 11,7 + \frac{1,8}{Pr^{1/3}}$$

$$\xi = (1,82 \lg Re - 1,64)^{-2} \quad /14/$$

Формула /13/ рекомендуется в интервале $0,7 \leq Pr \leq 1$ и при $1,5 \cdot 10^4 \leq Re \leq 2,5 \cdot 10^5$. При $Re < 1,5 \cdot 10^4$ она дает несколько завышенные результаты, поэтому, как показывают опытные данные, для вычисления Nu_0 при $7 \cdot 10^3 < Re < 1,25 \cdot 10^4$ лучше применять степенную зависимость

$$Nu = 0,022 Re^{0,8} Pr^{0,4} \quad /15/$$

Указанное обстоятельство, по-видимому, связано с изменением профиля скорости при умеренных числах Re . Формулы /13/ - /15/ справедливы в зоне стабилизированного теплообмена. Для ϵ_e на термическом начальном участке при $q_c = Const$ получена формула:

$$\epsilon_e = \frac{Nu}{Nu_{стаб}} = 1 + \frac{0,58}{(x/d)^{0,4}} e^{-0,17 \frac{x}{d}} \quad /16/$$

Формула /16/ при $\frac{x}{d} \geq 3$ дает результаты, хорошо согласующиеся с расчетными данными Спэрроу и др., Бэнкстона-Макэлиота и рекомендацией Филимонова и Хрусталева.

Теплоотдача при нагревании азота. Анализ опытных данных по теплоотдаче к азоту показал, что в фиксированных сечениях трубы влияние переменности свойств можно учесть с помощью одного параметра ψ . При этом, как отмечается в литературе, влияние температурного фактора на теплоотдачу увеличивается по длине трубы, однако, при $x/d \geq 50$ расслоение опытных точек по x/d при умеренных ψ трудно отделить от случайного разброса, определяемого ошибками измерений. Отчетливо видно также, что в логарифмических координатах зависимость $Nu_{ж}/Nu_{ож}$ от ψ для фиксированных x/d не является линейной. Это обстоятельство, к сожалению, не находит отражения во многих расчетных рекомендациях. Полученные дан-

ные при $x/d \geq 50$ с отклонением менее $\pm 5\%$ согласуются с

$$\frac{Nu_{ж}}{Nu_{ож}} = \psi^{-(0,36 + 0,3 \lg \psi)} \quad /17/$$

предложенной Б.С. Петуховым по результатам расчетно-теоретического анализа теплоотдачи к двухатомным газам; по этой формуле и осуществлялся пересчет величин $Nu_{ж}$, полученных в опытах с малыми температурными напорами $\psi \cong 1,15$, к изотермическим условиям.

При $x/d \geq 20$ наши данные удовлетворительно аппроксимирует также формула /4/; среднее расхождение по всем опытным точкам составляет $\sim 3,95\%$, максимальное $\sim 8\%$, что не выходит за пределы погрешности, с которой получена эта формула.

В исследованном диапазоне $1 < \psi < 2,1$ при $x/d > 50$ неплохие результаты дает также распространенная эмпирическая корреляция

$$Nu_{ж}/Nu_{ож} = \psi^{-0,5} \quad /18/$$

однако для более точных расчетов следует, очевидно, отдать предпочтение формулам /4/ и /17/. Таким образом, опытные данные по теплоотдаче к азоту согласуются с имеющимися в литературе сведениями, полученными для двухатомных газов. Это подтверждает надежность аппаратуры и методики измерений, использованных в настоящей работе.

Конвективная теплоотдача при нагревании аммиака. Анализ опытных данных по местной теплоотдаче к аммиаку, обработанных в соответствии с /2/, показал, что эффекты, связанные с изменением физических свойств NH_3 также можно в основном учесть с помощью двух аргументов - температурного фактора ψ и относительной координаты сечения x/d . Влияние началь-

ной температуры и числа Рейнольдса на относительное число Нуссельта является второстепенным.

Сопоставление опытных данных для NH_3 с имеющимися в литературе расчетными рекомендациями показало, что по сравнению с одно- и двухатомными газами температурный фактор влияет на теплоотдачу к аммиаку значительно слабее. Поэтому расчетные зависимости, полученные для простых газов, нельзя рекомендовать к применению в случае аммиака /см.табл. 2/.

При $\psi \leq 1,4$ местную теплоотдачу при нагревании NH_3 вообще можно рассчитывать /с точностью не хуже $\pm 5\%$, не вводя поправки на температурный фактор, по формуле для изотермического течения. Это обстоятельство было использовано выше при анализе теплоотдачи при $\psi \rightarrow 1$.

Обращает на себя внимание, что в случае аммиака зависимость $Nu_{ж}/Nu_{ож}$ от ψ для фиксированных сечений в логарифмических координатах носит ярко выраженный нелинейный характер; для аппроксимации этой зависимости использовано, как и в /4/, выражение:

$$Nu_{ж}/\epsilon_r Nu_{ож} = \psi^{m-n \lg \psi} \quad /19/$$

Значение m можно для всех сечений принять одинаковым и равным $m = 0,09$; величина n в зависимости от x/d выбирается из таблицы I.

Таблица I

Значения n в формуле /19/

$\frac{x}{d}$	0	5	10	20	30	40	50	60	60-90
n	0	0,2	0,28	0,44	0,60	0,76	0,90	1,01	1,10

Формула справедлива при граничном условии $q_c = Const$ в диапазоне $10^4 \leq Re_{ж} \leq 2,4 \cdot 10^5$; $295 \leq T_{ж1} \leq 425^\circ K$; $1 < \psi < 2,4 / 2$ при $x/d > 50/$; $3 \leq x/d \leq 90$. Формула обобщает опытные данные при $x/d \geq 20$ с максимальным разбросом $\pm 6\%$; при $x/d \leq 5$ разброс увеличивается до $\pm 10\%$. Как показал специальный анализ, отнесение свойств NH_3 к температуре стенки T_c не устраняет влияния температурного фактора; поэтому при $q_c = Const$ такой способ отнесения свойств следует признать для NH_3 нецелесообразным.

В таблице 2 формула /19/ сравнивается с формулами Петухова-Кириллова /4/ и Тейлора для простых газов, а также с формулой ВТИ и Р.Грегориго, которые рекомендуются их авторами для разных, в том числе и многоатомных газов. Сравнение производится при $Re_{ж} = 10^5$, $T_{ж} = 473^\circ K$ и $P_{гж} = 0,85$.

Сравнение показывает, что имеющиеся в литературе зависимости не дают удовлетворительных результатов в случае аммиака.

Таблица 2

Значения $\frac{Nu_{ж}}{Nu_{ож}}$ для NH_3 по формулам разных авторов

x/d	40			80		
	I	1,5	2	I	1,5	2
Петухов-Кириллов	0,985	0,883	0,780	0,985	0,854	0,714
Тейлор	1,07	0,862	0,740	1,07	0,856	0,730
Лельчук-Елфимов	1,11	0,925	0,810	1,11	0,905	0,782
Грегориго	I	0,897	0,816	I	0,884	0,790
Формула /19/	I	0,984	0,908	I	0,959	0,847

Обнаруженные особенности теплоотдачи к турбулентному потоку NH_3 можно объяснить, как и раньше, тем, что более существенное увеличение λ и c_p с температурой, которое наблюдается у аммиака, в значительной степени компенсирует отрицательное влияние изменений плотности и вязкости газа.

Обобщение данных по теплоотдаче при нагревании различных газов. Проведенное исследование теплоотдачи к аммиаку, который существенно отличается поведением своих свойств от ранее исследованных газов, открывает некоторые возможности для более обоснованного подвода к выводу расчетной зависимости, пригодной для любого газа с физическими свойствами, удовлетворяющими степенным соотношениям /1/. В качестве предпосылки было принято, что для всех газов влияние температурного фактора на местную теплоотдачу в круглой трубе при граничном условии $q_c = Const$ выражается соотношением типа /19/, где m и n определяются поведением свойств газа, а n , кроме того, зависит от относительной координаты x/d . Их значения определялись путем последовательных приближений на основании исходных формул /4/ и /19/ для N_2 и NH_3 и опытных данных. В результате получено следующее соотношение

$$\frac{Nu_{ж}}{\epsilon_l Nu_{ож}} = K_S = \psi^{0,53 n_p + \frac{1}{3} n_\lambda + \frac{1}{4} n_c - \phi(\frac{x}{d}) n_\eta \lg \psi} \quad /22/$$

или, используя /1/ и принимая $n_p = -1$

$$\frac{Nu_{ж}}{\epsilon_l Nu_{ож}} = K_S = \left(\frac{\lambda_c}{\lambda_j}\right)^{1/3} \left(\frac{c_{p,c}}{c_{p,j}}\right)^{1/4} \psi^{-[0,53 + \phi(\frac{x}{d}) \lg \frac{\eta_c}{\eta_j}]} /23/$$

Значения $\phi(x/d)$ приведены в таблице 3.

Формула /23/ была проверена путем сравнения с опытными данными МЭИ-ИВТАН для N_2 , ВТИ для Az и CO_2 и данными для NH_3 и N_2 , полученными в настоящей работе. Сравнение

проводилось при $20 \leq \frac{x}{d} \leq 100$ и $1 < \psi < 6$. Его результаты показали, что формула /23/ описывает опытные данные разных авторов для четырех газов с различным поведением λ , η и c_p с максимальным разбросом $\pm 10\%$ и среднеквадратичным $\pm 3,9\%$. Таким образом, формулы /22/ и /23/ можно рекомендовать для расчета местной теплоотдачи в круглых трубах в случае нагревания различных газов при граничном условии $q_c = Const$.

Таблица 3

Значения $\phi(x/d)$ в формулах /22/ и /23/

$\frac{x}{d}$	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	∞
ϕ	0,11	0,24	0,38	0,55	0,73	0,89	1,02	1,13	1,21	1,27	1,50

На рис. 2 показан пример расчета по формуле /23/ значения $Nu_{ж}/Nu_{ож}$ в сечении $x/d = 40$ для некоторых применяемых в технике газов. Рисунок наглядно показывает, насколько существенным является влияние индивидуальных особенностей, особенно у многоатомных газов. Видно также, что изменение показателей n_λ , n_η и n_c в интервале $T_{ж}$ от $173^\circ K$ до $373^\circ K$ дает второстепенный эффект у простых газов; у метана CH_4 это обстоятельство является существенным. В левой части рисунков показана экстраполяция формулы /23/ на область охлаждения газа. Интересно, что для простых газов при $\psi \geq 0,5$ формула дает результаты, качественно и количественно близкие к результатам измерений. При охлаждении многоатомных газов следует, вероятно, ожидать уменьшения $Nu_{ж}/Nu_{ож}$ с уменьшением ψ . Размеры этого эффекта требуют, конечно, экспериментального определения.

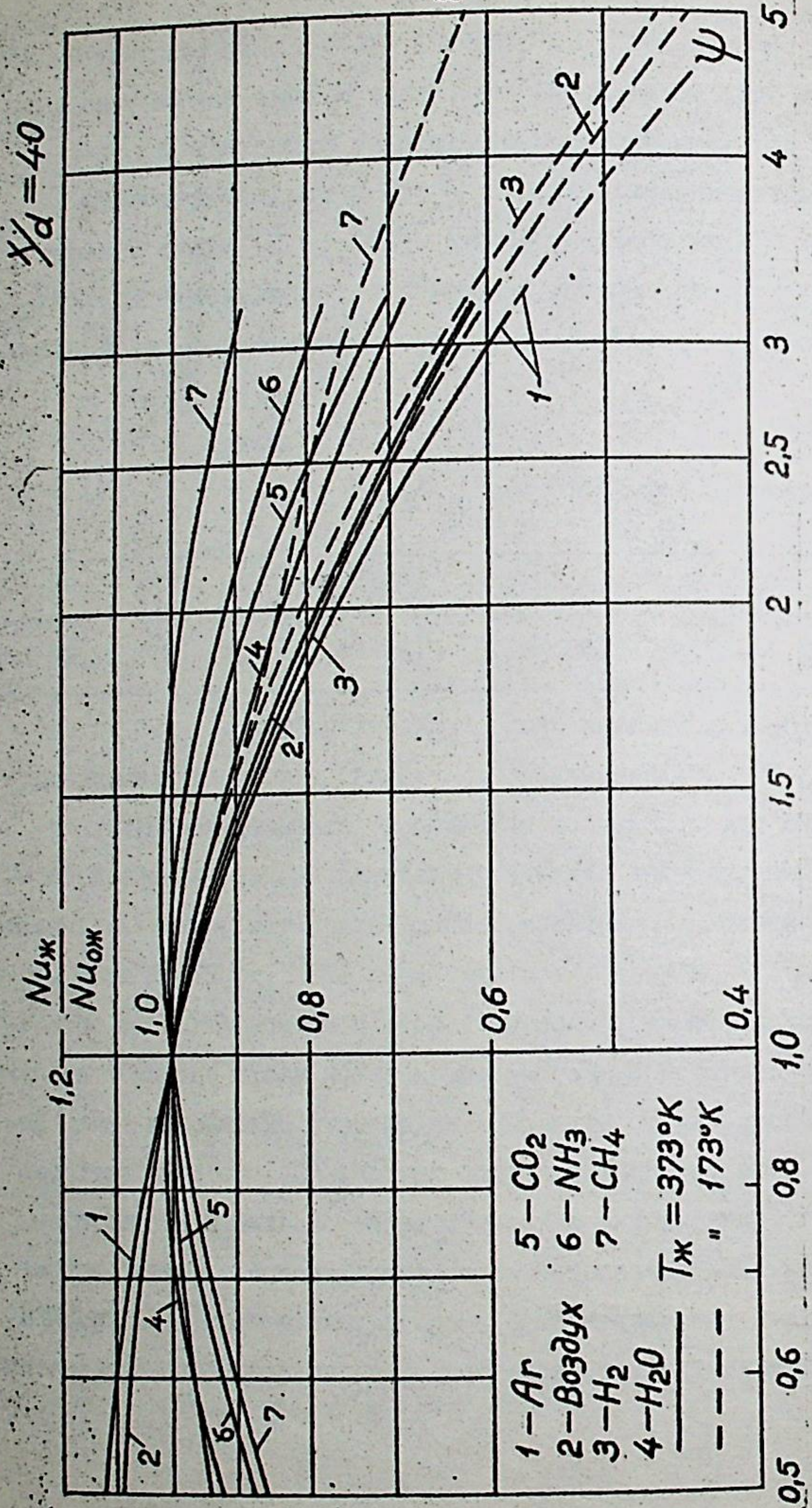


Рис. 2. Влияние температурного фактора на местную теплоотдачу в трубе при турбулентном течении газов / $q_c = Const$ / . Расчет по формуле [23] для $x/d = 40$; при $\psi < 1$, $T_c = 373^{\circ}K$.

5. Выводы

1. Проведено экспериментальное исследование средней и местной теплоотдачи при нагревании аммиака в короткой круглой трубе с плавным входом при граничном условии $T_c = Const$ в условиях существенного влияния переменности свойств газа.

2. Результаты этого исследования показали, что при ламинарном режиме течения на гидродинамическом начальном участке трубы:

а/ средние числа Нуссельта \overline{Nu}_i° , \overline{Nu}_j° и \overline{Nu}_j° увеличиваются с ростом температурного фактора ψ_1 / ψ ,

б/ местные числа Нуссельта Nu_i° также увеличиваются с ростом ψ_1 , причем этот эффект, по-видимому, возрастает по мере удаления от входа,

в/ в предельном случае постоянных свойств газа полученные обобщенные зависимости удовлетворительно согласуются с наиболее надежными данными других авторов,

г/ результаты численного решения задачи, проведенного в ИВТАНе, в случае NH_3 согласуются с полученными опытными данными по характеру зависимости $Nu_i^{\circ} / Nu_{i0}^{\circ}$ от ψ ; для воздуха, по данным расчетов ИВТАН, эта зависимость слабее, что говорит о существенном влиянии характера изменения свойств газа на теплоотдачу в рассматриваемых условиях.

3. При $Re > Re_{кр}$ длина участка трубы, на котором средняя теплоотдача подчиняется закономерностям, свойственным ламинарному режиму течения, определяется условием $Re_{ix} \leq 7,5 \cdot 10^4$; для местной теплоотдачи это условие имеет вид: $Re_{ix} \leq 4 \cdot 10^4$. Указанные значения, по-видимому, характерны для труб с плавно очерченным соплом и успокоительной

камерой на входе.

4. Проведено экспериментальное исследование теплоотдачи при турбулентном течении аммиака и азота в случае нагревания газа при граничном условии $q_c \cong \text{Const}$. Основные его результаты заключаются в следующем:

а/ полученные данные по местной теплоотдаче при малых температурных напорах позволили осуществить обоснованный выбор предельного выражения для числа Нуссельта при $\psi \rightarrow 1$. В диапазоне $0,7 \leq Pr \leq 1,0$ и $1,5 \cdot 10^4 \leq Re \leq 2,5 \cdot 10^5$ для определения Nu_0 можно рекомендовать формулу Петухова-Попова с поправочным множителем 1,05.

б/ опытные данные по теплоотдаче к азоту согласуются с наиболее достоверными сведениями, имеющимися в литературе для двухатомных газов, что подтверждает надежность аппаратуры и метода измерений,

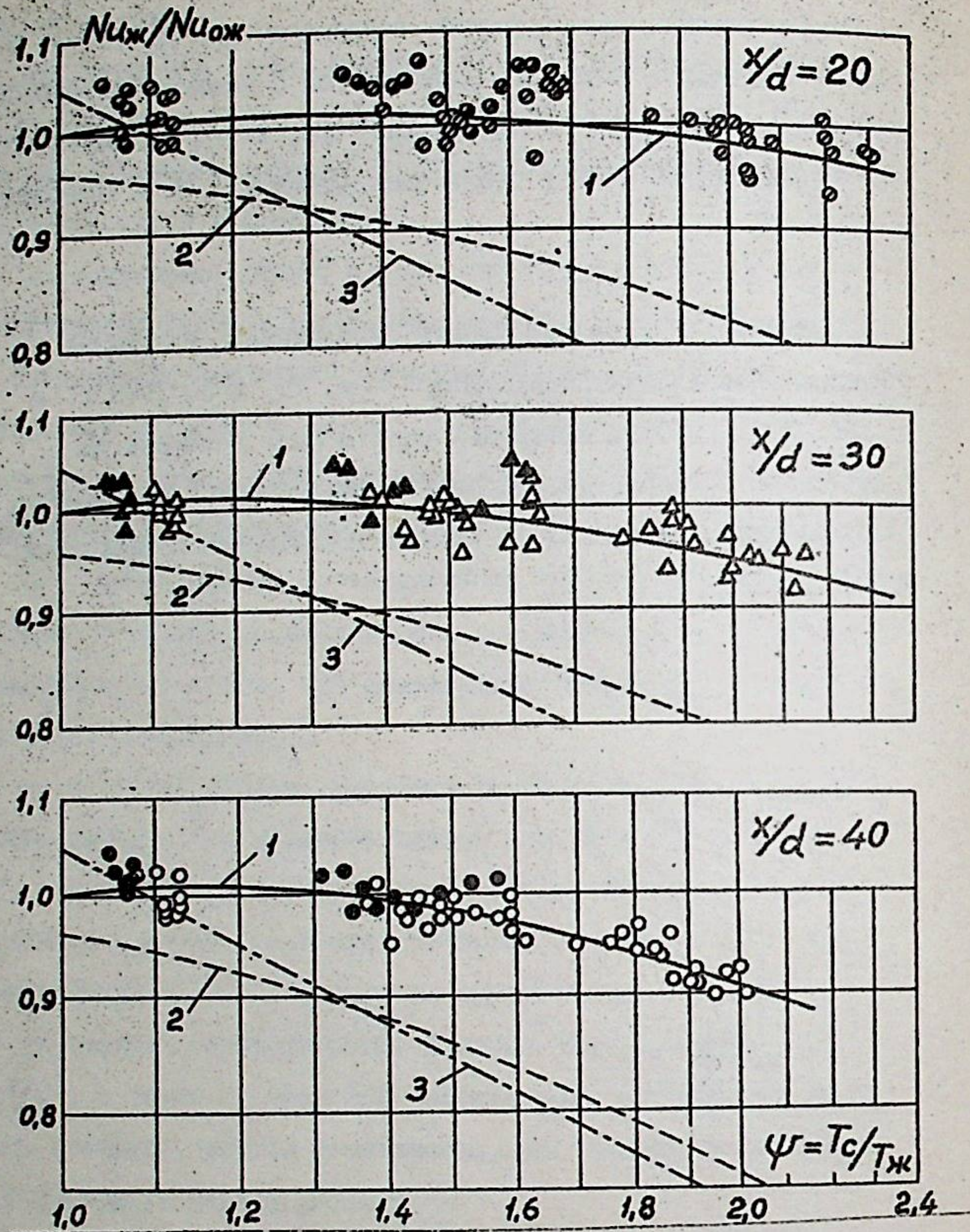
в/ в случае аммиака зависимость $Nu_{ж}/Nu_{ож}$ от температурного фактора значительно слабее /на 15 + 25% при $\psi \cong \cong 2/$, чем у азота и других простых газов; это говорит о существенном влиянии характера изменения λ , η и C_p многоатомных газов на теплоотдачу при турбулентном течении,

г/ влияние температурного фактора увеличивается с ростом x/d , а также по мере его собственного увеличения; предложена интерполяционная зависимость, обобщающая опытные данные с учетом указанных явлений.

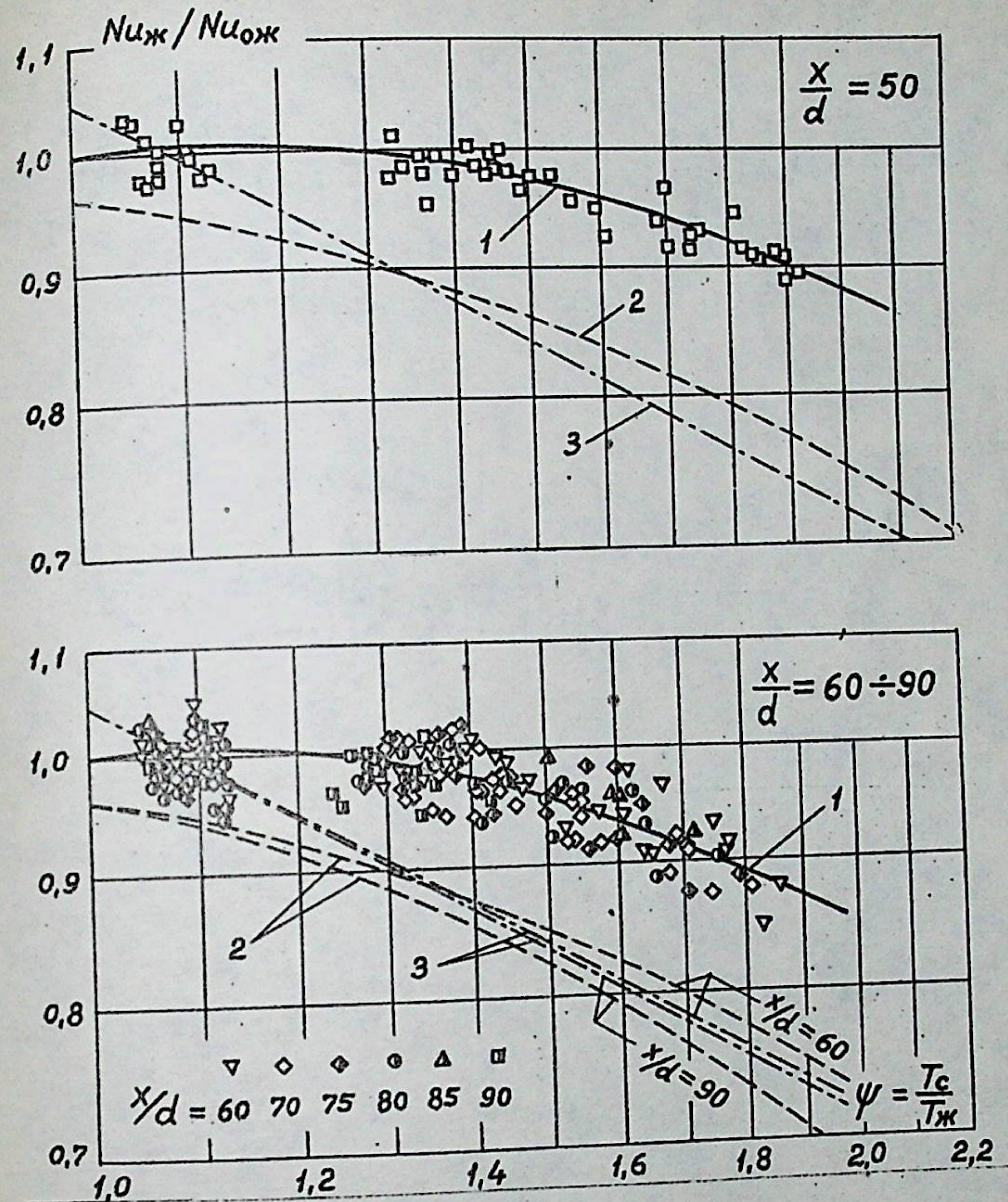
5. На основании собственных и имеющихся в литературе опытных данных получено единое уравнение для расчета местной теплоотдачи в круглой трубе при турбулентном несжимаемом те-

чении различных газов в случае нагревания при граничном условии $q_c = \text{Const}$. Уравнение согласуется с данными МЭИ-ИВТАН и ВТИ для четырех газов / Ar , N_2 , CO_2 и NH_3 / с максимальным отклонением $\pm 10\%$ и среднеквадратичным $\pm 4\%$ в интервале $1 < \psi < 6$.

Основное содержание работы опубликовано в журнале "Теплофизика высоких температур" - т. УП, № 5, 1969 г. и т. УШ, № 6, 1970 г. Материалы работы были доложены на Симпозиуме по тепло-массообмену и физической газодинамике, проводившемся в рамках IV Научно-технической конференции ИВТАН, 1970 г.



Влияние температурного фактора на теплоотдачу при нагревании аммиака NH_3 . 1 - по формуле /19/; 2 - по формуле /4/; 3 - по формуле М. Тейлора.



Влияние температурного фактора на теплоотдачу при нагревании аммиака NH_3 . 1 - формуле /19/; 2 - по формуле /4/; 3 - по формуле М. Тейлора.