

6
А67

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ СССР

МОСКОВСКИЙ ордена ЛЕНИНА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ
ИНСТИТУТ

В.Н. Майданик

На правах рукописи

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОТДАЧИ ПРИ ТУРБУЛЕНТНОМ
ТЕЧЕНИИ В ТРУБЕ ДИССОЦИИРУЮЩЕГО ГАЗА

(О1-053 - теплофизика)

(Диссертация на русском языке)

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва

1972 г.

7
Работа выполнена в Московском ордена Ленина
Энергетическом институте и Институте высоких темпера-
тур Академии Наук СССР.

Научный руководитель - д.т.н., проф. Б.С. Петухов

Официальные оппоненты:

д.т.н., проф. Э.К. Калинин

к.ф.-м.н., доц. Ю.В. Лапин

Ведущее предприятие указано в решении Ученого
Совета.

Автореферат разослан "27" марта 1972 г.

Защита диссертации состоится "3" марта 1972 г.
на заседании Ученого Совета при Московском ордена
Ленина Энергетическом институте.

Отзывы в двух экземплярах просим направлять по
адресу: Москва Е-250, Красноказарменная ул., дом 14,
Ученый Совет ИЭИ.

О дне защиты будет своевременно опубликовано в
газете "Вечерняя Москва".

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке
Института.

Ученый секретарь Совета

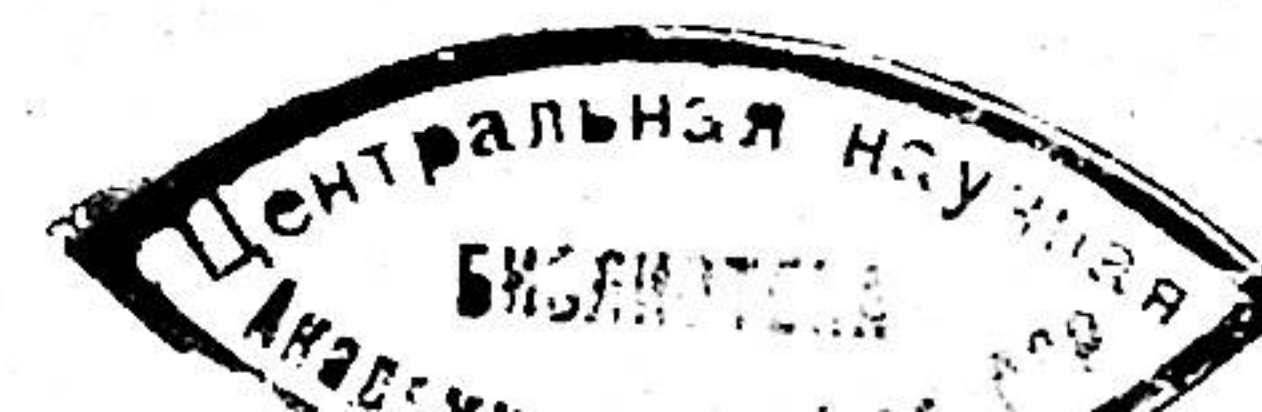
/И.А. Кочемаров/

В В Е Д Е Н И Е

Проблема теплообмена при течении в трубах химически
реагирующих газов возникла в последнее время в связи с
возможностью их использования в качестве теплоносителей и
рабочих тел в энергетических установках. Однако многие сто-
роны этой проблемы недостаточно изучены. В особенности мало
исследован вопрос о теплообмене в трубах при наличии нерав-
новесных химических реакций.

Процессы теплообмена при наличии химических реакций
достаточно сложны; их изучение требует учёта взаимосвя-
нных явлений переноса тепла, переноса массы и химических
превращений. Поэтому теоретический анализ задачи неизбежно
связан с рядом допущений. В большинстве работ рассматрива-
ется предельный случай - равновесное течение химически реа-
гирующей бинарной газовой смеси. При этом влияние реакции
учитывается введением так называемых эффективных физических
свойств $Cr_{эф}$ и $\lambda_{эф}$, зависящих только от температуры и
давления. Это позволяет рассматривать процессы теплообмена
в равновесно реагирующей бинарной смеси, как процессы тепло-
обмена в однородном газе с переменными физическими свойства-
ми.

Используя такой подход к решению задачи, Ирвинг и



Смит, Нанзи и Харин провели расчет теплоотдачи при турбулентном течении в трубе удаленности от входа равновесно диссоциирующей четырехокиси азота $N_2O_4 \rightleftharpoons 2NO_2$.

В случае течения химически реагирующей бинарной смеси при $Le = 1$ уравнения энергии, записанные для полной энthalпии реагирующего газа имеют тот же вид, что и для однородного газа. При течения равновесно диссоциирующего газа с несвязными температурными напорами, когда замороженные свойства можно считать постоянными, условие $Le = 1$ существенно упрощает учет влияния эффективных физических свойств на теплоотдачу. При этом расчет теплоотдачи можно проводить по эмпирическим зависимостям для нереагирующего газа с постоянными физическими свойствами, если коэффициент теплоотдачи относит к разности энthalпии газа на стенке и среднемассовой энthalпии газа.

Известен также ряд экспериментальных работ по теплоотдаче при равновесном течении диссоциирующей четырехокиси азота; опыты проводились в диапазоне температур, отвечающих первой стадии реакции диссоциации ($N_2O_4 \rightleftharpoons 2NO_2$), протекающей равновесно. В большинстве из них определялся средний по длине коэффициент теплоотдачи и наблюдался большой разброс опытных данных, что затрудняет их анализ и выяснение особенностей теплообмена.

Удельная теплоотдача при равновесном течении диссоции-

рующей четырехокиси азота ($N_2O_4 \rightleftharpoons 2NO_2$) исследовалась в работе Фергюсона и Смита, а также в ряде работ ИЯЭ АН БССР.

Что касается вопроса о теплообмене при конечной скорости химических реакций, то большинство работ, посвященных этой проблеме, относятся к случаю внешнего обтекания тел. Для случая течения в трубах известны расчетные работы Бриана с сотрудниками, в которых оценивается влияние неравновесной реакции диссоциации на теплоотдачу. Однако в силу ряда допущений, используемых при анализе (пленочная модель течения, малая разность температур газа на стенке и в потоке и другие), результаты этих работ могут служить лишь качественной характеристикой влияния неравновесной химической реакции на теплоотдачу.

Лалин и Вихорев разработали метод расчета теплоотдачи при турбулентном течении в трубе неравновесно диссоциирующего газа. При разработке метода использовалось минимальное число допущений, однако работа не доведена до расчетных зависимостей.

В работе Нестеренко и Тверковкина разработан метод расчета среднемассовых температуры и состава в различных сечениях при течении химически реагирующего газа. Недостаток метода заключается в использовании предположения о том, что осредненные по сечению потока значения скоростей реакций равны значениям этих величин, вычисленных по среднемас-

совой температуре.

Экспериментальное исследование теплоотдачи при неравновесном течении в трубах находится в настоящий момент в начальной стадии. Немногочисленные опытные данные по теплоотдаче к неравновесно диссоциирующей двуокиси азота, полученные в ИЯЭ, свидетельствуют о существенном влиянии неравновесной реакции на теплообмен. Однако они недостаточны для решения вопроса о характере этого влияния и разработки способа его учёта.

Таким образом, закономерности теплообмена при турбулентном течении диссоциирующего газа в трубах, в особенности при неравновесном течении, исследованы недостаточно.

В настоящей работе проведено экспериментальное исследование местной теплоотдачи при турбулентном течении в круглой трубе диссоциирующей четырехокиси азота в условиях нагрева.

Опыты проводились как при равновесном течении (первая стадия реакции диссоциации $N_2O_4 \rightleftharpoons 2NO_2$), так и при неравновесном течении ($2NO_2 \rightleftharpoons 2NO + O_2$), причем последним было уделено максимальное внимание. На основе анализа опытных данных предложен метод расчета теплоотдачи при равновесном и неравновесном течениях.

Экспериментальная установка и опытный участок

Экспериментальная установка выполнена в виде разомкнутого контура. Насыщенный пар четырехокиси азота генери-

ровался в трех обогреваемых баллонах. Система генерации пара обеспечивала расход парообразной N_2O_4 от 8 до 43 кг/час. После баллонов газ проходил перегреватель, опытный участок и холодильник, где охлаждался и конденсировался. Расход газа измерялся объемным методом по времени заполнения заранее протарированного объема сконденсированной четырехокиси азота и по известной плотности $\rho_{N_2O_4}(T)$. Температура жидкости внутри расходомера измерялась хромель-алюмелевой термопарой.

Установка была оборудована необходимой регулирующей и запорной арматурой, электроизмерительными приборами для контроля и регулирования рабочих параметров.

Для измерения теплоотдачи использовался рабочий участок, схема которого показана на рис. I. Основным элементом рабочего участка является опытная трубка из нержавеющей стали IX18NiOT внутренним диаметром 3,09 мм и наружным 4,00 мм. Длина обогреваемой части опытной трубки 360 калибров, длина успокоительного участка 50 калибров. Обогрев осуществлялся путем непосредственного пропускания через стенку трубки переменного электрического тока.

По длине обогреваемой части опытной трубки приварены четыре токоподвода: I, II, III и IV, как показано на рис. I(a). Такое расположение токоподводов позволяет определять сред-

немассовую температуру газа в трех сечениях: на выходе и в двух промежуточных А и Б. Для этого проводятся три опыта при одинаковых давлении, температуре газа на входе и массовом расходе; опытная трубка при этом обогревается на участках I - IV, II - IV и III - IV одинаковым по величине электрическим током. Так как расстояние между токоподводами II - IV и III - IV равно расстоянию от входного токоподвода до сечений Б и А соответственно (см. рис. 1а), то среднемассовая температура газа, измеренная на выходе из опытного участка, во втором и третьем опыте, будет приблизительно равна среднемассовой температуре в первом опыте в сечениях Б и А. Таким образом, для первого (основного опыта) мы располагаем значениями среднемассовой температуры в четырех сечениях (на входе, выходе и в двух промежуточных сечениях А и Б), что позволяет построить изменение среднемассовой температуры газа по длине опытной трубки в первом опыте.

Температура газа на входе и выходе из рабочего участка измерялась термопарами, установленными в потоке. Для обеспечения изотермичности потока во входной и выходной камерах, предусмотрен двойной ход газа по кольцевым зазорам, что позволяет существенно снизить тепловые потери. Перед выходной термопарой расположен смеситель, представляющий собой набор шайб с несимметрично просверленными отверстиями.

Температура наружной поверхности опытной трубки измеря-

лась платинородий-платиновыми термопарами диаметром 0,3 мм, приваренными к стенке. Температура внутренней поверхности определялась расчетным путем.

Э.д.с. термопар измерялись потенциометром Р 2/1. Термопары были отградуированы по показаниям образцового платинового термометра сопротивления до температур 900°К, и по показаниям образцовой платино-платинородиевой термопары при температурах от 900 до 1000°К.

Местное значение плотности теплового потока определялось по величине электрического тока (измерялся амперметром Д-57 класса 0,1) и по электрическому сопротивлению опытной трубки (определялось из тарировочных опытов).

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

Для проверки метода были проведены измерения теплоотдачи при течении в рабочем участке воды и водяного пара. Опыты проводились при малых температурных напорах ($\frac{T_c}{T_f} \leq 1,1$) в диапазоне числа Re от 10^4 до $7 \cdot 10^4$. Результаты опытов хорошо согласуются ($\pm 5\%$ - вода и $\pm 7\%$ - водяной пар) с уравнением для теплоотдачи при турбулентном течении жидкости (газа) с постоянными физическими свойствами. Это уравнение было получено в ИВТАН^е на основании теоретического расчета и анализа наиболее надежных экспериментальных данных. Проверялся также метод опытного определения среднемас-

совой температуры газа по длине опытной трубки. Для этого среднемаховая температура газа в сечениях А и Б определялась опытным путем и вычислялась из теплового баланса; расхождение не превышало 1,5% от общего перепада температур по длине опытной трубки.

Оценка погрешностей, проведенная в работе, показала, что максимальная относительная ошибка измерения коэффициентов теплоотдачи для всех опытов, за исключением трех, не превышает 11%.

Анализ и обобщение опытных данных по теплоотдаче
при равновесном и замороженном течениях

Рассмотрим результаты опытов, охватывающих диапазон давлений, температур и расходов газа, при которых для первой стадии реакции диссоциации четырехоксида азота ($N_2O_4 \rightleftharpoons 2NO_2$) течение является равновесным, а для второй ($2NO_2 \rightleftharpoons 2NO + O_2$) - замороженным.

Распределение среднемаховых температур по длине опытной трубки в этом случае определялось как путем непосредственных измерений, так и расчетом из теплового баланса по равновесным и замороженным энтальпиям соответственно. Расхождение измеренных и расчетных значений не превышало 5% от разности температур газа на входе и выходе из рабочего участка.

При обработке опытных данных использовались рассчитанные в ИЯЭ эффективные значения коэффициента теплопроводности и теплоемкости в диапазоне температур, отвечающим первой стадии реакции диссоциации, и замороженные значения C_p и λ в диапазоне температур, отвечающим второй стадии. Значения вязкости, на которую реакция диссоциации практически не влияет, определялись по экспериментальным данным, также полученным в ИЯЭ.

Все безразмерные числа, используемые при обработке, рассчитывались по физическим свойствам, отнесенным к температуре стенки.

Результаты обработки показали, что для расчета теплоотдачи к равновесно реагирующей бинарной смеси, когда число $Le=1$, можно использовать соотношения, полученные для случая течения однородного газа, если коэффициент теплоотдачи отнест к разности между энтальпией газа на стенке и средне-массовой энтальпией газа. В исследованном нами диапазоне температур и давлений число Le изменялось от 0,85 до 1,15, т.е. было близким к единице. По этой же причине выяснить влияние числа Le на теплоотдачу в наших опытах не представлялось возможным. Влияние же переменных замороженных физических свойств приближенно учитывалось выбором их при температуре стенки.

Таким образом, если определить коэффициент теплоотдачи α_h по формуле:

$$\alpha_h = q_c / (h_c - \bar{h}), \quad (1)$$

и ввести число St :

$$St = \alpha_h / \bar{\rho} \bar{W}, \quad (2)$$

то при равновесном и замороженном течениях теплоотдача будет описываться уравнением:

$$St = \frac{\zeta_c / 8}{1,07 + K(Re_c, Pr_c) + 12,7(Pr_c^{2/3} - 1)\sqrt{\zeta_c / 8}} \quad (3)$$

где: $Re_c = \frac{\bar{\rho} \bar{W} d}{\mu_c}, \quad Pr_c = \frac{\mu_c c_{p_c}}{\lambda_c}, \quad \zeta_c = (1,82 \lg Re_c - 1,64)^{-2}$

$$K(Re_c, Pr_c) = \frac{900}{Re_c} - \frac{0,63}{1 + 10 Pr_c}.$$

Это уравнение было получено в ИВТАН"е для теплоотдачи при турбулентном течении вдали от входа жидкости (газа) с постоянными физическими свойствами. Его использование оправдано тем, что в опытах температурные напоры были невелики, а расстояние первого сечения, в котором измерялась теплоотдача, от начала обогреваемого участка составляло 25 диаметров.

Из рис. 2, где наши опытные данные по теплоотдаче при равновесном и замороженном течениях сопоставлены с уравнением (3), видно, что это уравнение описывает опытные данные с точностью $\pm 10\%$. Уравнение (3) справедливо в диапазоне изменения числа Re от $2,5 \cdot 10^4$ до $2,5 \cdot 10^5$, числа Pr от 0,68 до 1,00 (давление изменялось в опытах от 3 до 45 атм). В случае равновесного течения это уравнение описывает опытные данные в диапазоне температур, отвечающим первой стадии реакции диссоциации $N_2 O_4$, а в случае замороженного течения оно описывает опытные данные до значения $K_2 = 25$ (подробности см. ниже).

Наши опытные данные сравнивались с результатами расчета Попова и Харина, проведенного для случая, когда первая стадия реакции диссоциации протекает равновесно, а вторая - заморожена. Опытные данные дают более высокое значение теплоотдачи, чем результаты расчета. Наибольшее расхождение (до 50%) наблюдается при равновесном течении и температурах стенки, попадающих в диапазон температур, соответствующих протеканию второй стадии реакции диссоциации $N_2 O_4$. Возможно, это несоответствие вызвано тем, что в работе Попова и Харина использовались значения плотности, рассчитанные по равновесному составу, что может привести к некоторым погрешностям.

Сравнение наших опытных данных с опытными данными Фергюсона и Смита показало, что при числах $Re \approx 2 \cdot 10^4$ согласование удовлетворительное, а при числа Re от $3 \cdot 10^4$ до $6,8 \cdot 10^4$, наши опытные данные, в среднем, на 15% выше. Эта разница, возможно, связана с неточным знанием эффективных физических свойств.

Уравнение (3) сопоставлялось также с опытными данными по теплоотдаче к диссоциирующей $N_2O_4 \rightleftharpoons 2NO_2$ при охлаждении, полученными в ИЯЭ. Результаты сравнения показали, что уравнение (3) удовлетворительно описывает эти данные.

Анализ и обобщение опытных данных при неравновесном течении

Рассмотрим результаты опытов, охватывающих диапазон давлений, температур и расходов газа, при которых протекает, вообще говоря, неравновесно, вторая стадия реакции диссоциации четырехоксида азота, т.е. происходит диссоциация двуокиси азота: $2NO_2 \rightleftharpoons 2NO + O_2$.

На рис. 3а и 3б приведены графики распределения по длине опытной трубки температуры стенки T_c и среднemasсовой температуры \bar{T} (определенной из опыта) для характерных режимов. Там же для сравнения нанесены значения среднemasсовых температур, вычисленных из теплового баланса в предположении равновесного и замороженного течения, \bar{T}_p и \bar{T}_z

соответственно. О степени завершенности реакции мы могли судить по отклонению среднemasсовой температуры газа \bar{T} от \bar{T}_p и \bar{T}_z . Рис. 3а соответствует неравновесному течению. При более высоких температурах и давлении и меньших расходах относительная скорость реакции соответственно возрастает. Этот случай представлен на рис. 3б, из которого видно, что среднemasсовая температура газа на конце опытной трубки практически совпадает (в пределах точности опытов) с \bar{T}_p .

При обработке опытных данных в случае неравновесного течения диссоциирующей двуокиси азота коэффициент теплоотдачи α' относился к разности температур $T_c - \bar{T}_0$, а число Nu'_c определялось из соотношения:

$$Nu'_c = q_c d / \lambda_c (T_c - \bar{T}_0), \quad (4)$$

где: q_c - местная плотность теплового потока, d - внутренний диаметр опытной трубки, λ_c - замороженный коэффициент теплопроводности при температуре стенки (определялся по расчетным данным ИЯЭ), T_c - местное значение температуры стенки, \bar{T}_0 - температура начала реакции диссоциации двуокиси азота, которую мы, несколько условно, определяли по точке минимума эффективной теплоемкости, рассчитанной в предположении равновесного протекания как первой, так и второй стадий реакции диссоциации четырехоксида азота.

Местонахождение сечения, в котором $\bar{T} = \bar{T}_0$ определялось по найденной из опыта кривой распределения среднemasсовой температуры газа по длине опытной трубки. Большинство опытов было проведено при температуре газа на входе в опытный участок примерно равн. \bar{T}_0 .

С целью обобщения опытных данных был проведен анализ задачи о теплообмене при неравновесном течении диссоциирующей двуокиси азота методом подобия. Результаты анализа приводят к соотношению:

$$Nu'_c / Nu'_{oc} = \left(\frac{x}{d}, \frac{\omega \cdot x}{\rho W}, \frac{q_c}{\rho W Q_p} \right), \quad (5)$$

где параметр $\omega \cdot x / \rho W$ можно интерпретировать как отношение времени пребывания газа в опытном участке к характерному времени реакции. Здесь ω - масштаб скорости реакции диссоциации двуокиси азота, равный $K_f \rho^2$, где K_f - константа скорости этой реакции, а ρ - плотность смеси. Параметр $q_c / \rho W Q_p$ характеризует отношение подведенной энергии к теплу, поглощенному за счет химической реакции; Q_p - теплота реакции диссоциации NO_2 .

Значение Nu'_c определяется по опытным данным с помощью соотношения (4), а Nu'_{oc} определяется по формуле, полученной в ИВТАН"е для теплоотдачи при турбулентном течении жидкости (газа) с постоянными физическими свойствами. Если

эту формулу пересчитать, относя коэффициент теплоотдачи к разности $T_c - \bar{T}_0$ и выбрать физические свойства по температуре стенки, то она принимает вид:

$$Nu'_{oc} = \frac{\zeta_c Re_c Pr_c}{1,07 + K(Re_c, Pr_c) + \sqrt{\zeta_c/8} (Pr_c^{2/3} - 1) + (\zeta_c/2)(x/d)}, \quad (6)$$

где $\zeta_c, Re_c, Pr_c, K(Re_c, Pr_c)$ определяются также как и в уравнении (3), x - расстояние от сечения, в котором $\bar{T} = \bar{T}_0$ до сечения, в котором определяется число Nu'_{oc} .

Анализ опытных данных показывает, что отношение Nu'_c / Nu'_{oc} зависит от отношения параметров $\frac{\omega \cdot x}{\rho W}$ и $\frac{q_c}{\rho W Q_p}$, т.е. от параметра $K_2 = \frac{\omega \cdot x \cdot Q_p}{q_c}$, вычисленного при температуре стенки. Эта зависимость показана на рис. 4, откуда видно, что $\frac{Nu'_c}{Nu'_{oc}}$ однозначно зависит от этого параметра, причем при $K_2 < 25$, это отношение приблизительно равно единице. Поэтому значение $K_2 = 25$ можно рассматривать как предельное в том смысле, что при $K_2 < 25$ влиянием реакции диссоциации NO_2 можно пренебречь, и расчет теплоотдачи приводить как по уравнению (6), так и по уравнению (3).

При $K_2 > 25$ отношение Nu'_c / Nu'_{oc} возрастает с увеличением K_2 . При $K_2 > 10^4$ наблюдается замедление роста отношения Nu'_c / Nu'_{oc} , причем оно стремится к значению, приблизительно равному отношению эффективного коэффициента теплопроводности к замороженному, определенных по температуре стенки. При

дальнейшем увеличении K_2 следует ожидать, что теплоотдача будет соответствовать значениям, определенным по равновесным свойствам из уравнения (3).

Результаты измерения теплоотдачи при турбулентном течении неравновесно диссоциирующей двуокиси азота в условиях нагревания описываются интерполяционным уравнением:

$$\frac{Nu_c'}{Nu_{oc}'} = \left[\frac{1 + 2,05 \cdot 10^{-3} K_2^{1,17}}{1 + 3,5 \cdot 10^{-6} K_2^{1,17}} \right]^{0,15} \quad (7)$$

Кривая, рассчитанная по уравнению (7), приведена на рис. 4, откуда видно, что это уравнение описывает наши опытные данные с разбросом $\pm 10\%$ во всем диапазоне исследованных параметров, т.е. среднемассовых температур газа \bar{T} от 490°K до 880°K , давлений от 5 до 45 атм, температур стенки T_c от 540 до 990°K , чисел Re_c от $2 \cdot 10^4$ до $2 \cdot 10^5$, и до значений $K_2 = 6,4 \cdot 10^4$.

Сравнение уравнения (7) с некоторыми опытами, проведенными в ИЯЭ показало, что это уравнение описывает эти опытные данные с несколько большим разбросом. Последнее возможно связано с неточным определением сечения, в котором $\bar{T} = T_0$.

Представляется интересным сравнить измеренные в опытах среднемассовые температуры газа при неравновесном течении диссоциирующей двуокиси азота с распределением среднемассовых температур, рассчитанным по одномерным уравнениям, предложенным в работе Нестеренко и Тверковкина. Для условий

наших опытов эти расчеты были проделаны в ИВТАН"е. Результаты сравнения показали, что измеренные значения среднемассовых температур ложатся ниже расчетных. Эта разница повидимому вызвана тем, что в упомянутой выше работе, осредненные по сечению значения скорости реакции диссоциации NO_2 принимались равными значениям этих величин, определенных по среднемассовой температуре.

С целью определения эффективных значений константы скорости, использование которых при расчете среднемассовых температур диссоциирующей NO_2 в одномерном приближении приводило бы к лучшему согласованию измеренных и рассчитанных значений, была решена обратная задача: по измеренным в наших опытах распределениям среднемассовых температур по длине опытной трубки, из системы одномерных уравнений, описывающих изменение среднемассовых температур и состава, рассчитывались значения константы скорости реакции диссоциации двуокиси азота - K_f . Значения K_f рассчитывались как по результатам основных опытов, так и по данным серии опытов на обогреваемой трубке внутренним диаметром 3,92 мм и длиной 94 калибра, в которой измерялось опытным путем распределение среднемассовой температуры диссоциирующей двуокиси азота по длине опытной трубки.

Результаты расчета показаны на рис. 5, откуда видно, что температурная зависимость значений константы скорости,

полученных из расчета и по литературным данным практически совпадают, однако, рассчитанные значения при среднемассовой температуре в среднем в 4 раза выше. Такой результат, по-видимому, объясняется тем, что в опытах с нагреванием пристенный слой газа имеет более высокую температуру, а скорость реакции резко (экспоненциально) увеличивается с увеличением температуры.

Используя эффективные значения константы скорости, полученные из нашей оценки, были вновь рассчитаны в ИВТАН"е по одномерным уравнениям распределения среднемассовых температур в наших опытах. Результаты расчета для большинства опытов удовлетворительно совпали с измеренными в опытах среднемассовыми температурами диссоциирующей двуокиси азота.

Таким образом, эффективные значения константы скорости реакции диссоциации NO_2 , полученные из нашей оценки, можно использовать для одномерного расчета среднемассовых температур при турбулентном течении неравновесно диссоциирующей NO_2 в исследованном диапазоне температур, давлений и температурных напоров $75 < T_c - \bar{T} < 160^\circ K$.

На основании сравнения измеренных в опытах распределений среднемассовой температуры неравновесно диссоциирующей двуокиси азота с рассчитанной в предположении равновесного или замороженного течения (\bar{T}_p и \bar{T}_3 соответственно), были определены условия, при которых течение будет отклоняться от

равновесного или замороженного. Для этой цели использовался параметр $\bar{K} = \bar{w} \cdot x \cdot Q_p / q_c$, который отличается от параметра K_2 , используемого при обработке опытных данных по теплоотдаче при неравновесном течении диссоциирующей NO_2 тем, что в нем масштаб скорости реакции \bar{w} вычисляется по среднемассовой температуре. Были определены два предельных значения параметра \bar{K} , а именно $\bar{K}_1 = 5$ и $\bar{K}_2 = 70$. Это означает, что в опытах при $\bar{K} < 5$ измеренная среднемассовая температура совпадает с \bar{T}_3 , а при $\bar{K} > 70$ приблизительно (в пределах точности опытов) совпадает с \bar{T}_p .

В ы в о д ы

1) Разработан метод исследования и создана экспериментальная установка, позволившие получить надежные экспериментальные данные по теплоотдаче при турбулентном течении диссоциирующей четырехокиси азота в условиях нагревания.

2) Проведено экспериментальное исследование местной теплоотдачи при турбулентном течении диссоциирующей N_2O_4 в круглой трубе в диапазоне изменения температуры стенки от 350 до 990°K, среднемассовой температуры газа от 340 до 800°K, давления от 3 до 45 атм, чисел Re от $2,5 \cdot 10^4$ до $2,5 \cdot 10^5$. Получено около 270 опытных точек.

3) Результаты измерений теплоотдачи в диапазоне давлений, температур и расходов газа, при которых течение явля-

ется равновесным или замороженным с точностью $\pm 10\%$ описывается уравнением (3). Это уравнение, в котором коэффициент теплоотдачи отнесен к разности между энтальпией газа на стенке и среднemasсовой энтальпией газа, имеет тот же вид, что и уравнение, полученное в ИВТАН^е для теплоотдачи при постоянных физических свойствах.

4) Результаты измерения теплоотдачи при неравновесном течении диссоциирующей двуокиси азота (вторая стадия реакции диссоциации четырехокси азота $2NO_2 \rightleftharpoons 2NO + O_2$) показывают существенное влияние скорости реакции диссоциации на теплообмен. Это влияние может быть учтено с помощью параметра $K_2 = \frac{\omega_c \cdot X \cdot Q_p}{q_c}$, который представляет собой отношение тепла, поглощенного при химической реакции, к подведенному теплу. Предложено интерполяционное уравнение (7), обобщающее опытные данные с точностью $\pm 10\%$. В этом уравнении коэффициент теплоотдачи отнесен к разности между температурой стенки T_c и температурой газа \bar{T}_0 , соответствующей началу реакции диссоциации двуокиси азота. Уравнение справедливо для теплоотдачи при турбулентном течении диссоциирующей двуокиси азота при нагревании во всем диапазоне исследованных параметров.

5) По измеренному в опытах распределению среднemasсовой температуры неравновесно диссоциирующей двуокиси азота по длине опытной трубки рассчитаны "эффективные" значения кон-

танты скорости реакции диссоциации NO_2 , использование которых при расчете среднemasсовой температуры по одномерным уравнениям приводит к лучшему согласованию измеренных и рассчитанных значений.

6) На основании анализа измеренных среднemasсовых температур неравновесно диссоциирующей двуокиси азота установлены предельные значения параметра \bar{K} , а именно $\bar{K}_1 = 5$ и $\bar{K}_2 = 70$. Это означает, что при $\bar{K} < 5$ измеренные температуры газа практически совпадают (в пределах точности опытов) с рассчитанными в предположении, что реакция диссоциации NO_2 заморожена, а при $\bar{K} > 70$ совпадают с температурой газа, рассчитанной в предположении, что эта реакция протекает равновесно.

Основное содержание работы опубликовано в журнале "Теплофизика высоких температур" - т. УШ, № 1, 1971 г. и т. УШ, № 2, 1971 г. Материалы работы были доложены на Симпозиуме по тепло-и массообмену и физической газодинамике, проводившемся в рамках IУ Научно-технической конференции ИВТАН, 1970 г.

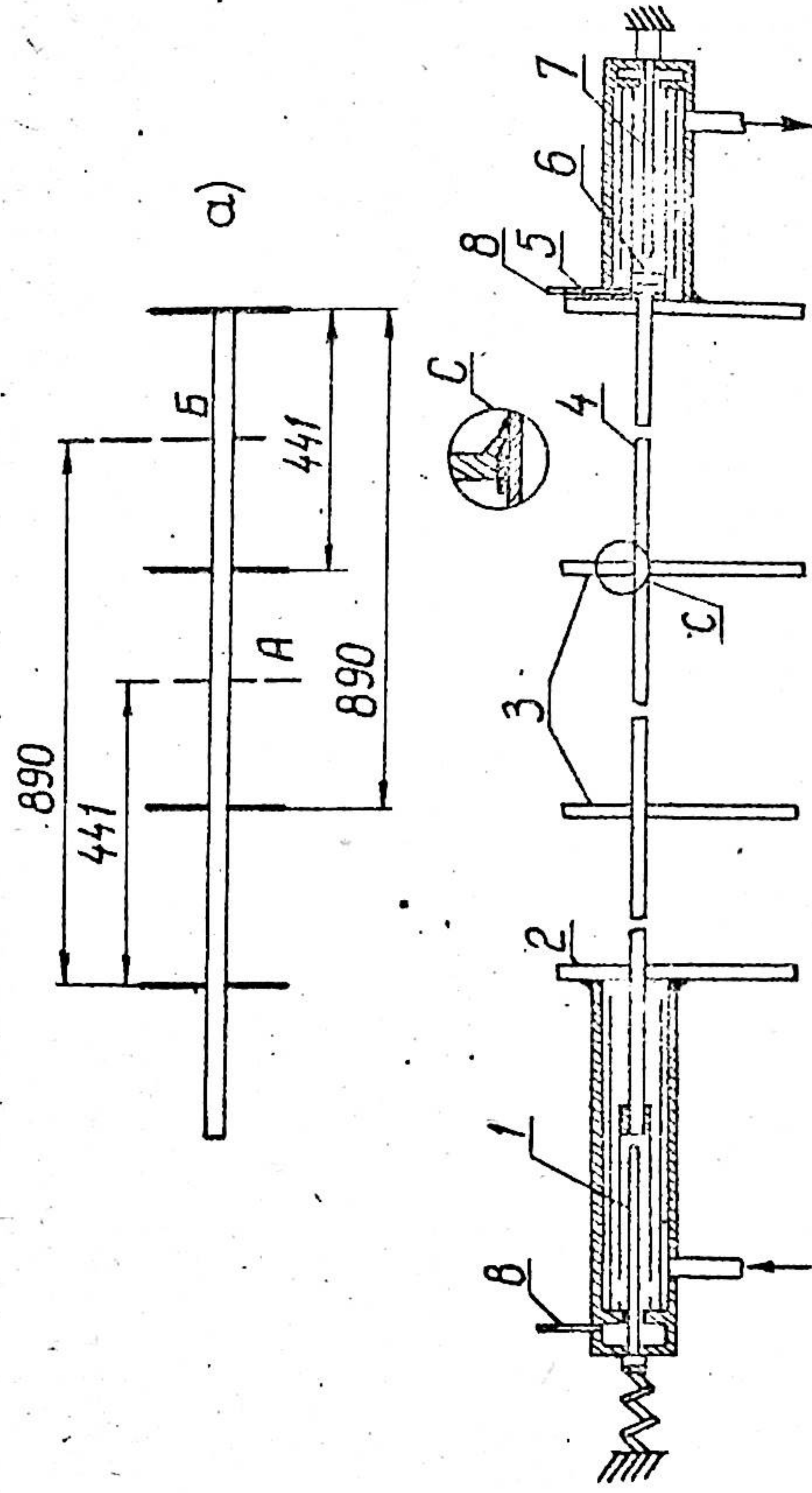


Рис. 1. Схема опытного участка: 1 - входная термометра, 2 - входной токоподвод, 3 - промежуточные токоподводы, 4 - опытная трубка, 5 - выходной токоподвод, 6 - смеситель, 7 - выходная термометра, 8 - отбор давления.

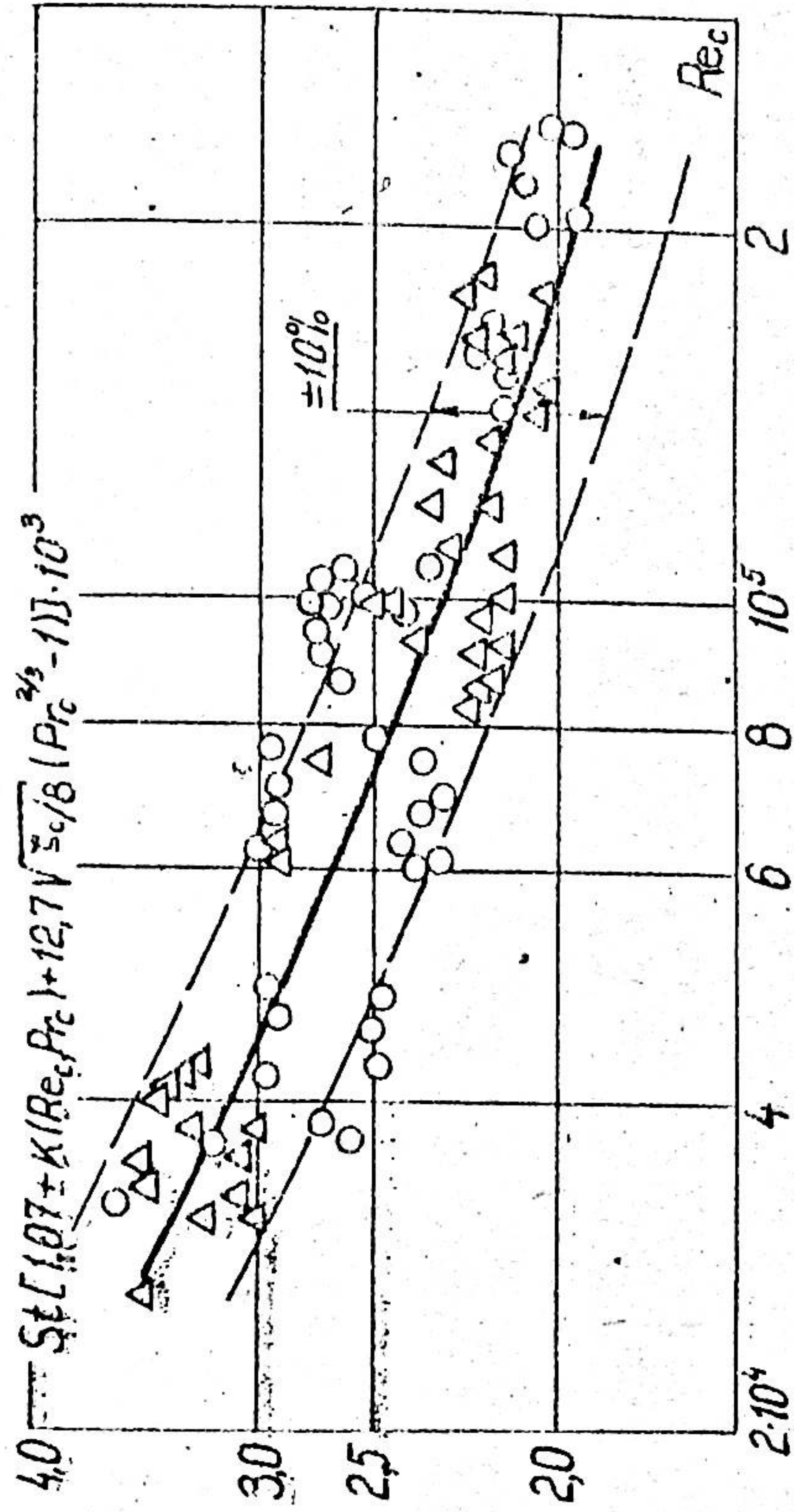


Рис. 2. Обобщение опытных данных по теплоотдаче при равновесном и замороженном течении: \circ - равновесное течение, Δ - замороженное течение.

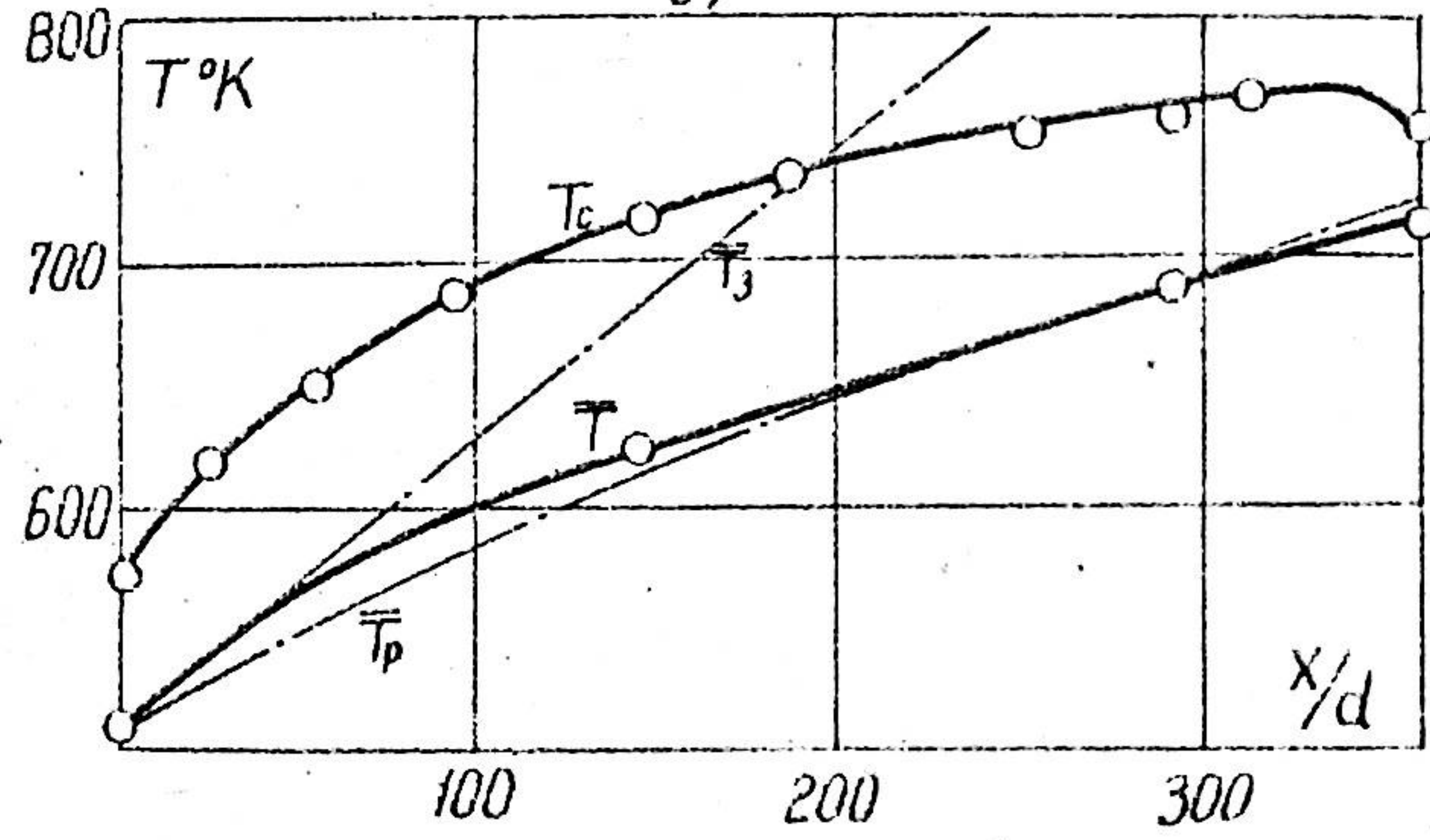
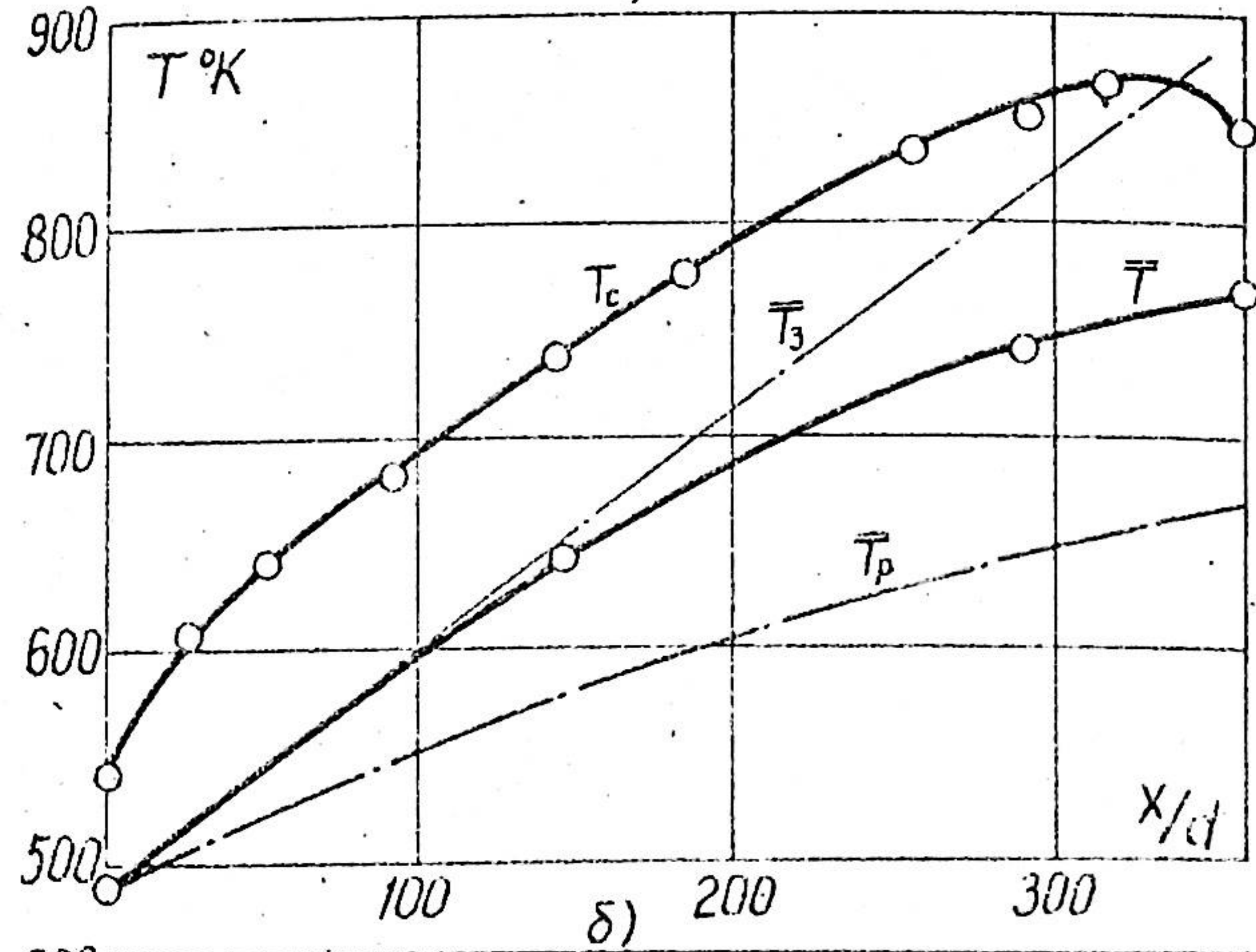


Рис. 3.

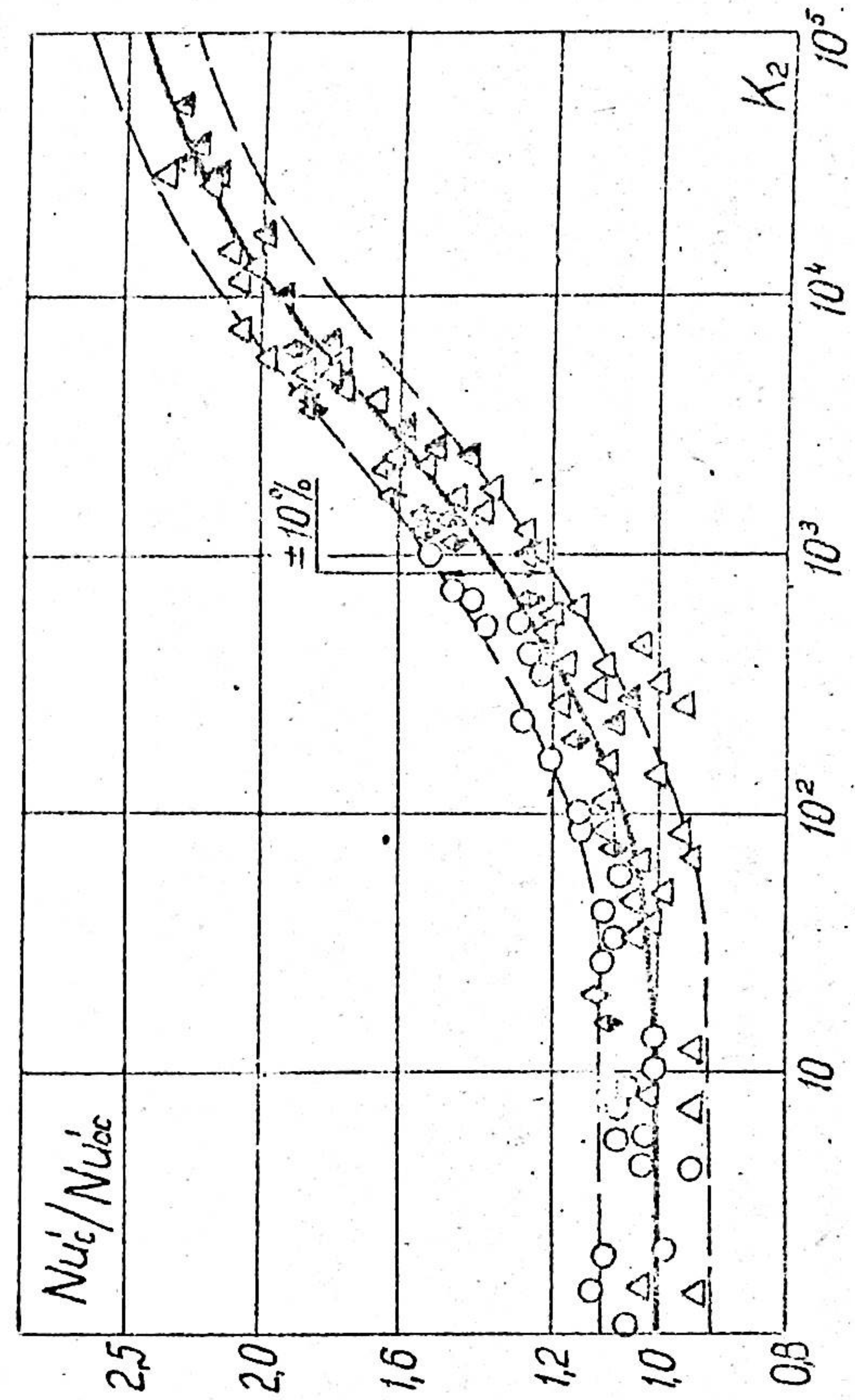


Рис. 4. Обобщение опытных данных по теплоотдаче при неравнотечной течи.

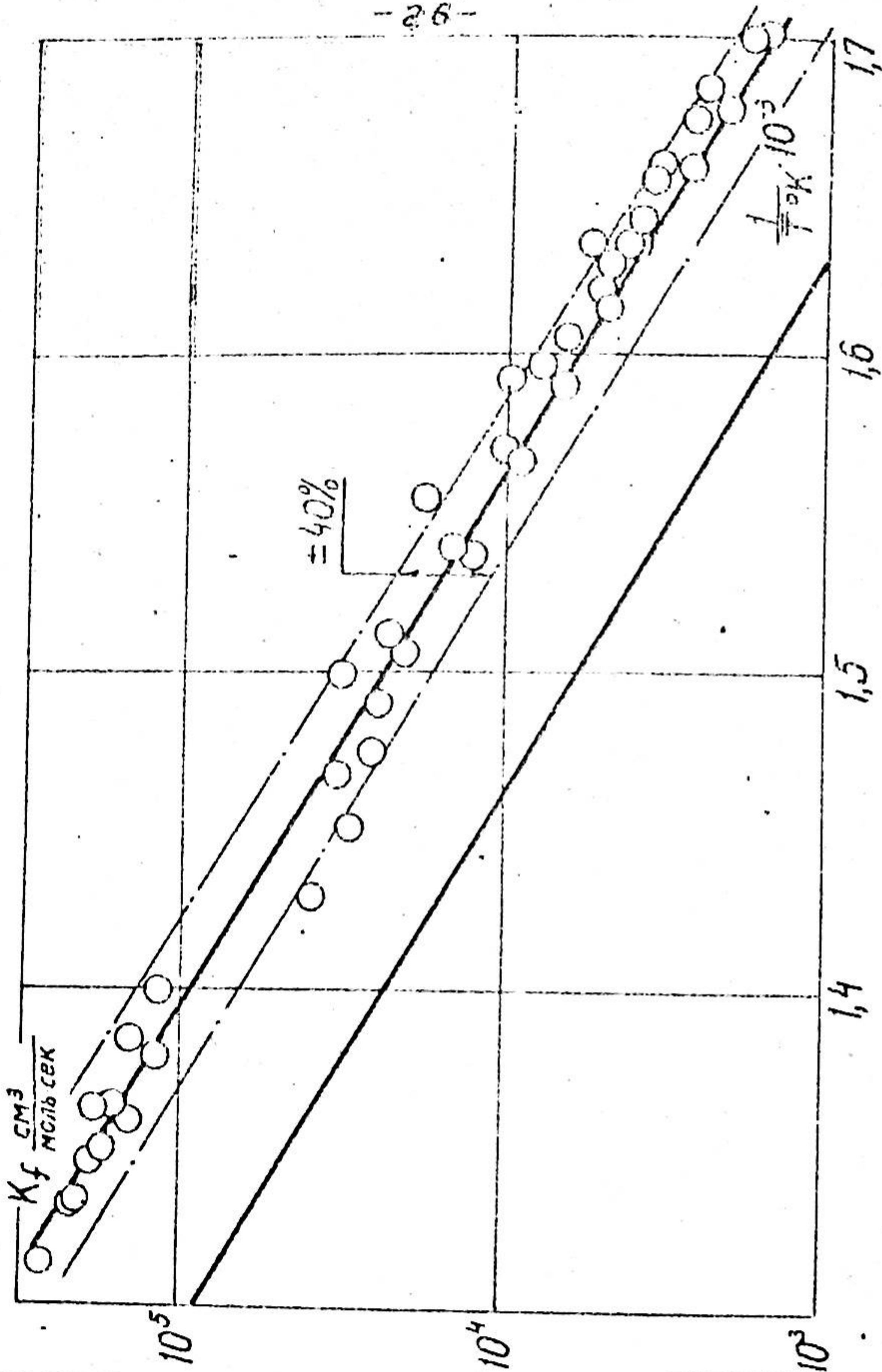


Рис. 5.