

На правах рукописи

Л. Б. АВЕТИСЯНЦ

СЖИГАНИЕ БЕДНЫХ ГАЗОВ

*Автореферат диссертации, представленной
на соискание ученой степени
кандидата технических наук*

Научный руководитель:
доктор техн. наук, проф.
С. Н. ШОРИН

МОСКВА 1957

ВВЕДЕНИЕ

В промышленной теплотехнике в ряде производств приходится встречаться с большими количествами газов-отходов, которые отличаются весьма низкой теплотворной способностью $100 \div 300$ ккал/м³. К таким бедным газам относятся продувочные газы генераторов водяного газа, газы регенерации при каталитическом крекинге нефти, отходящие газы многих промышленных печей и т. д.

Несмотря на низкую теплотворную способность этих газов, потеря тепла топлива при выбрасывании газов в атмосферу оказывается весьма значительной. Помимо большой потери тепла топлива, выбрасывание бедных газов влечет загрязнение атмосферы ядовитой окисью углерода. Дожигание бедных газов может сэкономить значительное количество ценного топлива и будет способствовать очищению атмосферы.

Бедные газы отличаются низкой концентрацией элементарных горючих газов CO, H₂ и др.; так, при теплотворной способности газа 300 ккал/м³ концентрация CO и H₂ не превышает $5 \div 6\%$ для каждого.

Такие небольшие концентрации горючих газов находятся или ниже, или вблизи нижнего предела воспламенения горючей смеси. Поэтому вопрос о дожигании бедного газа, имея большое практическое значение, представляет достаточно трудную задачу. Помимо большого практического значения, исследование процесса горения бедного газа представляет существенный научный интерес.

Вопрос о рациональном устройстве для сжигания бедного газа уже давно возникал при конструировании газогенераторных установок для получения водяного газа. Однако в большинстве газогенераторных установок по производству водяного газа бедные газы «горячей продувки» до сих пор выбрасываются в атмосферу. Совершенно недостаточное предварительное перемешивание бедных газов с воздухом, недостаточная температура воздуха и недостаточная стабилизация воспламенения приводят к тому, что дожигания бедных газов на существующих установках или совсем не

128344

ЦЕНТРАЛЬНАЯ НАУЧНАЯ
БИБЛИОТЕКА
А.Н. Нияргиевской ССР

происходит, или сопровождается такими ударными вспышками, что приходится немедленно отключать подачу воздуха для дожигания газа.

Имеются следующие возможности для сжигания бедных газов:

сжигание в условиях необходимого теплового режима и сжигание в условиях действия катализатора.

В выполненной нами работе была поставлена цель рассмотреть и изучить условия для сжигания бедных газов при тепловом воспламенении.

ОСОБЕННОСТИ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА ПРИ ГОРЕНИИ БЕДНОГО ГАЗА

Тепловое воспламенение бедной горючей смеси определяется нижним пределом концентрации горючего газа. Для основных элементарных горючих газов H_2 , CO и CH_4 в смеси с воздухом при комнатной температуре нижние пределы воспламенения соответственно составляют 4; 12,5 и 5%. Этим концентрациям отвечают теплотворные способности соответственно 103, 378 и 428 ккал/м³. Теоретические температуры горения указанных смесей на нижнем пределе воспламенения соответственно составляют 320, 1003 и 1090° С.

Из всех элементарных горючих газов H_2 , CO и CH_4 водород отличается своей исключительной способностью к тепловому воспламенению. Несравненно более трудной воспламеняемостью обладают окись углерода и метан.

Таким образом, следует ожидать наиболее облегченного теплового режима при сжигании таких бедных газов, в составе которых находится водород. Для сжигания газов, в составе которых преимущественно будет находиться окись углерода или метан, необходим тепловой режим с температурой в зоне горения не менее 1000 ÷ 1100° С.

Наивысшая температура в зоне горения определяется теоретической температурой горения, которая зависит от состава горючей смеси. Теоретическую температуру сгорания бедного газа можно повысить путем подогрева воздуха и особенно газа. Повышая теоретическую температуру сгорания путем подогрева воздуха и газа, можно соответственно снизить предел воспламеняемости горючей смеси.

Количество потребного воздуха для сжигания бедного газа является небольшим, и поэтому теоретическая температура сгорания бедного газа сравнительно слабо зависит от коэффициента избытка воздуха. Более заметно теоретиче-

ская температура сгорания бедного газа зависит от температуры подогрева воздуха и особенно заметно — от температуры самого газа.

Ввиду исключительно большого влияния теоретической температуры на объемную скорость сгорания газа и несравненно меньшего влияния концентрации кислорода окисляется целесообразным сжигать бедный газ с коэффициентом избытка воздуха, не превышающим 1,2.

Тепловой режим в зоне горения газа определяется интенсивностью тепловыделения и теплопередачей продуктов сгорания. Теплопередача в зоне горения происходит за счет конвективного и кондуктивного переносов тепла, а также за счет излучения.

Действительная температура в зоне горения находится в зависимости от состава горючей смеси, температуры газа и воздуха, условий их предварительного перемешивания, интенсивности тепловыделения, размеров зоны горения, излучающей способности продуктов сгорания, конвективного и кондуктивного переноса тепла и температуры окружающих стенок. Эта зависимость может быть представлена следующей формулой:

$$\bar{t}_z = t_{теор} \left[1 - \frac{\varepsilon_z 4,9 \cdot 10^{-8} (\bar{T}_z^4 - \bar{T}_{cm}^4) + \alpha (\bar{t}_z - \bar{t}_{cm})}{q_F} \right] \frac{c_{теор}}{c_z},$$

где \bar{t}_z — средняя температура зоны горения;

$t_{теор}$ — теоретическая температура горения;

\bar{t}_{cm} — средняя температура окружающих стенок;

ε_z — излучающая способность зоны горения;

α — коэффициент конвективной теплоотдачи;

q_F — удельное тепловыделение в зоне горения, отнесенное к единице площади граничной поверхности;

c_z и $c_{теор}$ — теплоемкости продуктов сгорания при температуре в зоне горения и теоретической температуре сгорания.

Удельное объемное тепловыделение в зоне горения зависит от качества горючей смеси и условий предварительного смешивания газа и воздуха. Как известно, наименьшим удельным тепловыделением отличается чисто диффузионное горение газа. При этом относительно большая теплопередача при медленном диффузионном горении не позволяет

получить в зоне горения достаточно высокую температуру. Именно по этой причине способ диффузионного горения совершенно непригоден для сжигания бедного газа.

Наиболее приемлемым способом сжигания бедного газа является предварительное полное перемешивание газа со всем необходимым для горения подогретым воздухом и ограждение зоны горения от всех заметных потерь тепла.

Наибольшая трудность сжигания бедной горючей смеси в потоке связана с плохой стабилизацией фронта горения в месте воспламенения смеси. Для стабилизации теплового воспламенения большое значение имеет накопление тепла в зоне горения, для чего оказывается целесообразным поместить в зону горения бедного газа насадку из твердых тел.

Температура поверхности твердого тела, помещенного в зону воспламенения горючей смеси, будет повышаться во времени тем быстрее, чем меньше коэффициент теплоотвода (коэффициент теплоусвоения) твердого тела.

Удельный теплоотвод в массу тела с поверхности определяется формулой

$$q_{F,\tau} = \sqrt{\frac{\lambda c \gamma}{\pi \tau}} (t_{0,F} - t_a),$$

где λ , c и γ — коэффициент теплопроводности, теплоемкость и объемный вес тела;

τ — время;

$t_{0,F}$ — температура поверхности тела в начальный момент времени;

t_a — начальная температура массы тела.

Чем меньше будут коэффициент теплопроводности, теплоемкость и объемный вес материала, тем быстрее будет накаливаться такой материал в зоне горения, тем выше будет его температура и тем лучше условия стабилизации для сжигания бедного газа.

Особенно большое значение стабилизация теплового воспламенения имеет при периодическом поступлении бедного газа, как это, например, имеет место в газогенераторных установках по производству водяного газа.

Наивыгоднейшие условия для организации процесса сжигания бедного газа при колеблющемся режиме его поступления могут быть достигнуты в слое керамической крошки с малым коэффициентом теплоусвоения. Малый коэффициент теплоусвоения будет способствовать более быстрому прогреванию крошки с поверхности, а малая

теплопроводность крошки будет уменьшать потерю тепла из зоны горения и в последней может быть достигнута температура, близкая к теоретической.

АЭРОДИНАМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССА ПРИГОТОВЛЕНИЯ ГОРЮЧЕЙ СМЕСИ

Как уже отмечалось выше, необходимым условием для сжигания бедных газов является полное предварительное перемешивание газа со всем необходимым для горения воздухом. Такое перемешивание целесообразно осуществлять путем струйного ввода воздуха в поток газа.

Длина пути смешения в наибольшей мере определяется начальным диаметром истечения струи и в меньшей мере начальной скоростью истечения. Приблизительно эту зависимость для турбулентной струи можно выразить формулой

$$L_{см} = Ad_0^{0,83} w_0^{0,31},$$

где d_0 и w_0 — начальный диаметр и начальная скорость истечения струи.

Для сокращения длины смешения целесообразно весь поток смешиваемого с газом воздуха разбить на ряд мелких струй.

Для подогрева воздуха, который при сжигании бедного газа следует доводить до возможно более высокой температуры, требуется устройство специального теплообменника. Такой теплообменник целесообразно осуществлять по принципу противоточной схемы подогрева. Для этой цели трубы теплообменника, по которым течет воздух, необходимо разместить в камере над дожигательной насадкой, пройти трубами слой насадки, в котором происходит дожигание газа, и закончить трубы соплами для вдувания струй воздуха навстречу потоку газа, поступающему для сжигания.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Экспериментальная установка для изучения условий сжигания бедного газа (рис. 1) состояла из баллона с жидким газом, ресивера, смесительной газовой горелки, печи для получения бедного газа с двумя газоходами и передвижными холодильниками в них для регулирования температуры газа, дожигательного устройства, вентилятора для подачи воздуха и парового эжектора для отсасывания продуктов сгорания.

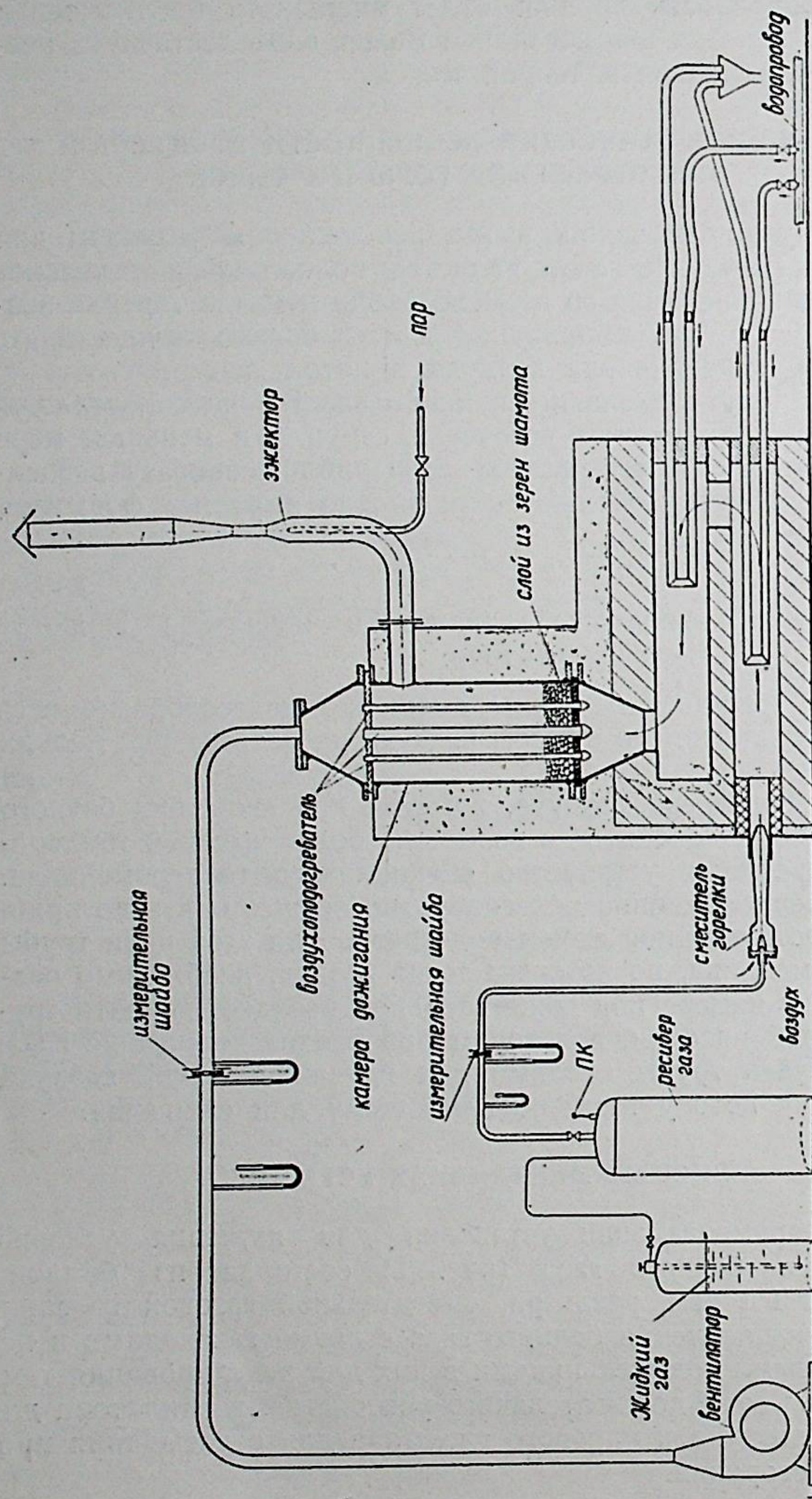


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для сжигания бедных газов.

Дожигательное устройство представляет слой мелкой крошки из шамотного кирпича, расположенного на дырчатой решетке из жароупорной стали.

Шамотная крошка отличается сравнительно малым коэффициентом теплоусвоения и малой теплопроводностью, что позволяло довольно быстро получать в зоне горения высокую температуру.

Исходным газом для проведения опытов являлись продукты сгорания, получаемые от сжигания жидкого газа при помощи беспламенной туннельной горелки.

Навстречу поступающему из печи горячему бедному газу, в котором в основном содержались окись углерода и водород, вдувался горячий воздух из сопел с диаметром отверстий 1,4 мм.

Все сопла насажены на трубки воздухоподогревателя, изготовленного из жароупорной стали. Готовая смесь бедного газа с горячим воздухом продувалась через слой раскаленной крошки, расположенной на дырчатой решетке. Трубки воздухоподогревателя проходят дырчатую решетку, слой шамотной крошки и пространство над дожигательным слоем.

Продукты сгорания по выходе из слоя дожигательной насадки проходят теплообменную камеру воздухоподогревателя и под разрежением эжектора отсасываются наружу.

Для уменьшения тепловых потерь весь корпус дожигательного устройства был тщательно изолирован.

При проведении опытов по дожиганию бедного газа производились измерения: расхода газа и воздуха, температур газа, воздуха, продуктов сгорания, слоя дожигательной насадки, давления и разрежения воздуха, состава бедного газа и продуктов сгорания.

Опыты проводились при различных температурах газа, поступающего в дожигательное устройство, и различном содержании элементарных горючих газов CO и H_2 , а также при различных коэффициентах избытка воздуха. Температура газа, поступающего в дожигательное устройство, регулировалась посредством ввода двух холодильников в газопроводы печи и изменялась в пределах $400 \div 800^\circ \text{C}$. Состав бедного газа изменялся путем изменения количества воздуха, подаваемого в смеситель горелки при сжигании жидкого газа, так чтобы продукты сгорания содержали суммарное количество элементарных горючих газов CO и H_2 от 3 до 10%, что соответствует теплотворной способности $100 \div 300 \text{ ккал/нм}^3$.

Температура вторичного воздуха находилась в соответствии с температурой, развиваемой в слое дожигательной насадки, и была на $50 \div 100^\circ \text{C}$ ниже ее.

Температура в слое зависела от теплотворной способности сжигаемого газа и степени его выгорания.

Опыты проводились со скоростью продувания газа через насадку от $0,07$ до $0,2 \text{ нм}^3/\text{м}^2 \cdot \text{сек}$. Скорость отнесена к полной площади сечения слоя без учета зерен, что соответствует удельному тепловому напряжению от 200 до $500 \cdot 10^3 \text{ ккал}/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$.

Большое количество проведенных опытов при различной температуре и теплотворной способности сжигаемого газа позволило отыскать зависимость степени выгорания газа от его температуры.

РЕЗУЛЬТАТЫ ОПЫТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Многочисленные опыты по дожиганию бедного газа, проведенные на экспериментальной лабораторной установке, показали:

1. При содержании в бедном газе небольших количеств горючих элементарных газов порядка $4 \div 5\%$ ($\text{H}_2 + \text{CO}$), что соответствует теплотворной способности газа $100 \div 120 \text{ ккал}/\text{нм}^3$, частичное выгорание наступало при температуре газа около 500°C ; полное выгорание газа происходило при температуре порядка 800°C и выше.

2. При горении газа температура дожигательной насадки значительно повышалась и достигала в зависимости от теплотворной способности бедного газа и степени его выгорания до $1\,000 \div 1\,100^\circ \text{C}$.

3. Температура вторичного воздуха, поступающего из сопел воздухоподогревателя, была на $50 \div 100^\circ \text{C}$ ниже температуры насадки и достигала $950 \div 1\,000^\circ \text{C}$.

4. Выгорание бедного газа при хорошем предварительном перемешивании его с воздухом в диапазоне $\alpha = 1,05 \div 1,2$ заметно не изменялось с изменением коэффициента избытка воздуха; дальнейшее повышение коэффициента избытка воздуха $\alpha > 1,2$ вызывало понижение степени выгорания газа, так как снижалась теоретическая температура горения бедного газа.

5. При увеличении диаметров отверстий сопел воздухоподогревателя горение бедного газа при прочих одинаковых условиях ухудшалось, так как понижалось качество перемешивания газа и воздуха вследствие ограниченной длины пути смешения перед насадкой.

6. Степень выгорания бедного газа несколько повышалась с увеличением толщины слоя насадки и уменьшением диаметра зерен благодаря уменьшению потерь тепла в окружающую среду в зоне горения и увеличению теплоотдачи раскаленных зерен насадки к поступающей горючей смеси.

Следует отметить, что все опыты проводились при толщине слоя насадки $4 \div 10 \text{ см}$, состоящей из зерен шамотного кирпича размером $5 \div 6 \text{ мм}$. Увеличение толщины слоя насадки и уменьшение размера зерен сопровождалось увеличением газового сопротивления слоя.

7. В условиях предварительного раскаления насадки до температуры 900°C и выше дожигание бедного газа происходило при сравнительно низкой температуре поступающего газа порядка 400°C ; степень выгорания газа при этом достигала $80 \div 90\%$.

8. При холодной насадке горение бедного газа, даже при сравнительно высокой его температуре, порядка $700 \div 750^\circ \text{C}$, хотя и наступало, но степень выгорания при этом была чрезмерно низкой, порядка $20 \div 40\%$.

9. С увеличением температуры слоя насадки повышалась температура подогрева воздуха, что приводило к повышению теоретической температуры горения газа и способствовало устойчивому дожиганию газа.

Следует отметить, что опыты проводились при различных температурах поступающего газа, изменяемых в пределах $400 \div 900^\circ \text{C}$. При этом степень выгорания газа в большей мере зависела от температуры самого газа и температуры насадки, чем от коэффициента избытка воздуха и теплотворной способности газа, которая в опытах колебалась в пределах $100 \div 300 \text{ ккал}/\text{нм}^3$.

10. Опыты проводились со скоростью продувки газа через слой дожигательной насадки до $0,2 \text{ нм}^3/\text{м}^2 \cdot \text{сек}$, что соответствует удельному тепловому напряжению около $500 \cdot 10^3 \text{ ккал}/\text{м}^2 \cdot \text{час}$.

Газовое сопротивление слоя дожигательной насадки при толщине слоя от 4 до 10 см и зернах диаметром $5 \div 6 \text{ мм}$ в зависимости от скорости продувания газа в опытах составляло от 4 до 30 мм вод. ст.

На рис. 2, 3 и 4 представлены результаты опытов по сжиганию бедного газа в виде зависимости степени выгорания от температуры поступающего газа, от температуры в насадке и от теоретической температуры сгорания бедного газа.

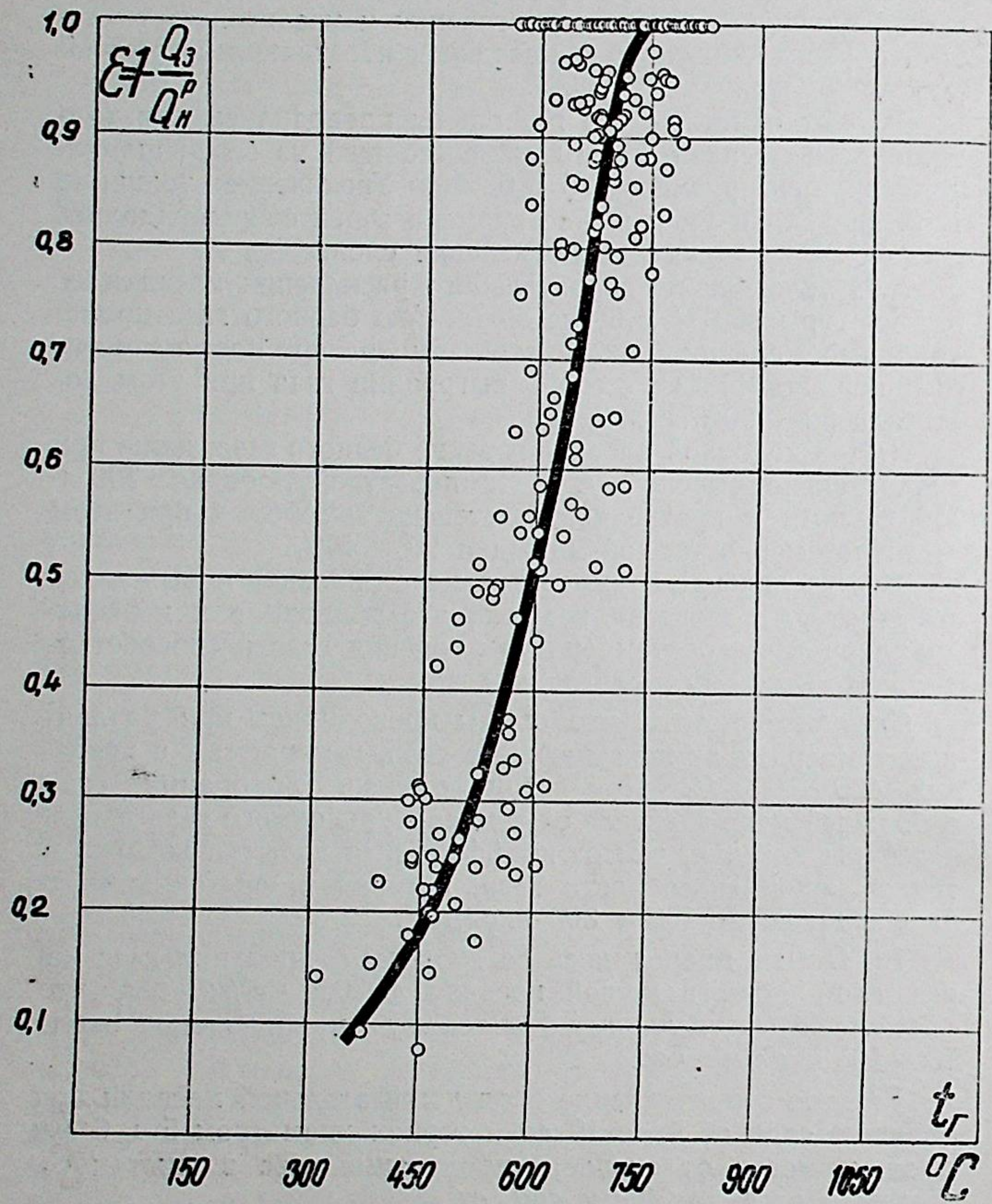


Рис. 2. Степень выгорания газа в зависимости от его начальной температуры.

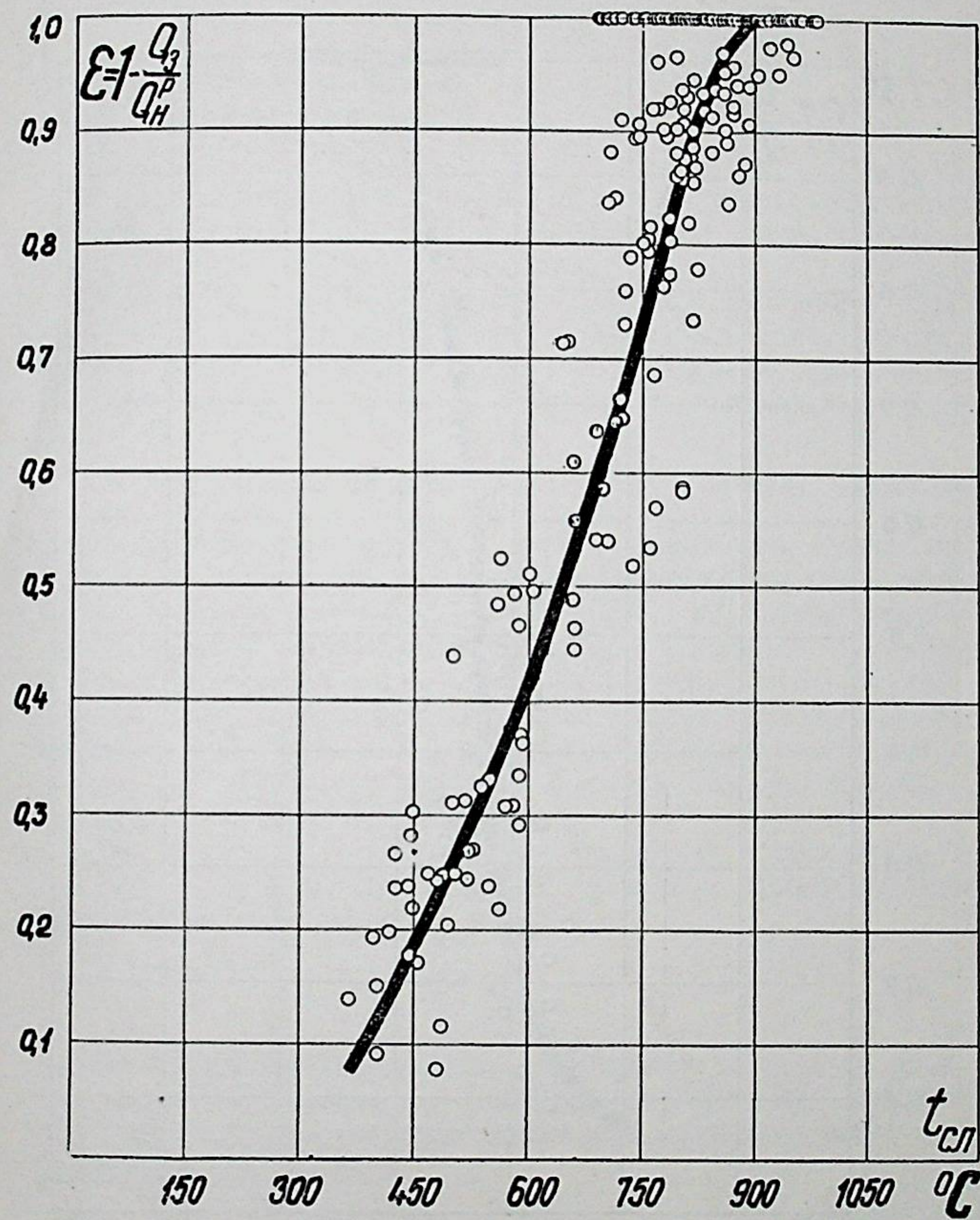


Рис. 3. Степень выгорания газа в зависимости от температуры в слое насадки.

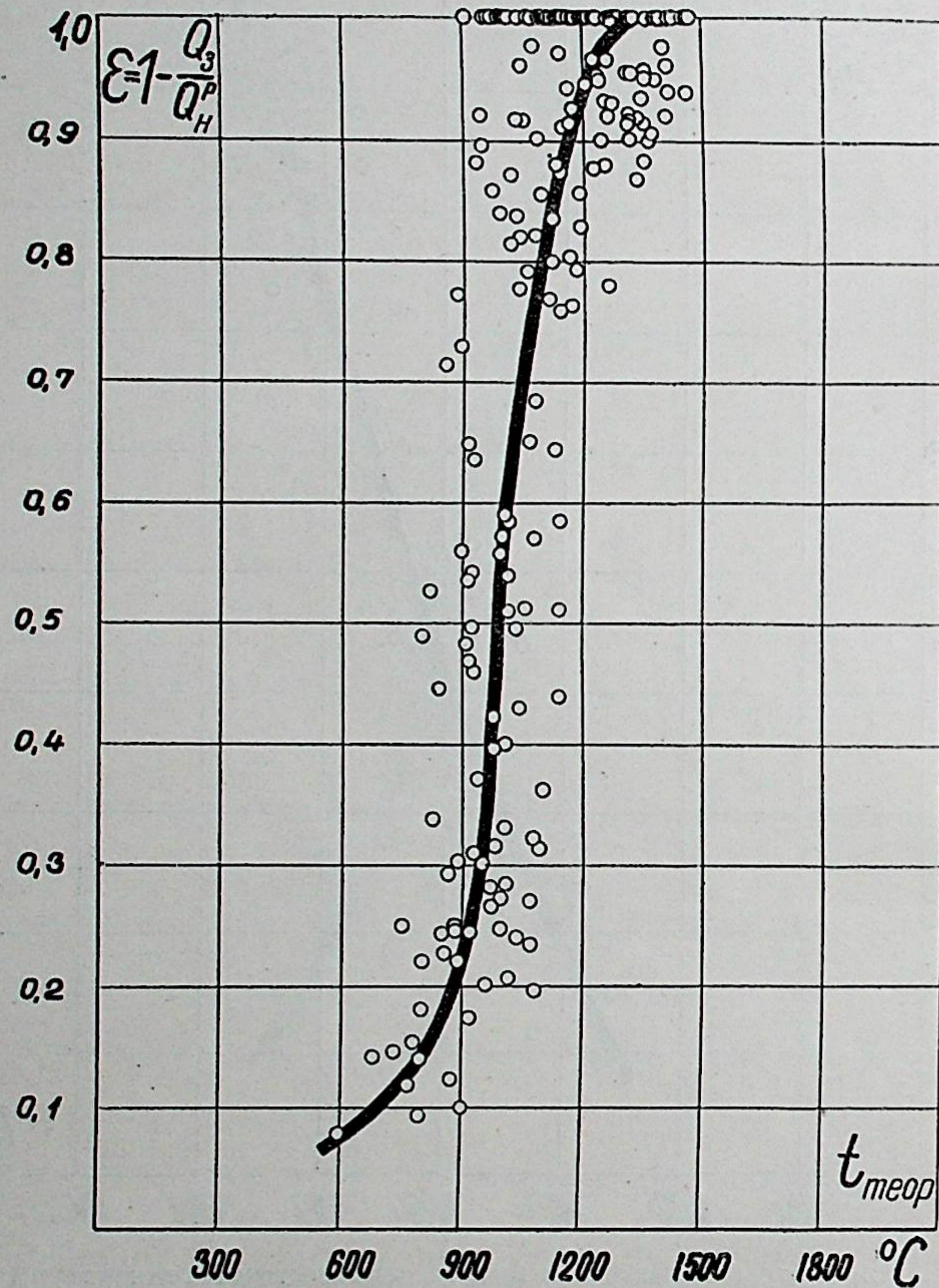


Рис. 4. Степень выгорания газа в зависимости от теоретической температуры сгорания.

Характер зависимости степени выгорания газа отвечает известной зависимости скорости химических реакций от температуры

$$v \approx e^{-E/RT}$$

где E — энергия активации;
 R — газовая постоянная;
 T — температура.

Этого и следовало ожидать, так как скорость выгорания готовой газовой смеси определяется главным образом скоростью химической реакции.

Помимо начальной температуры, степень выгорания газа зависит от состава газа, его теплотворной способности, коэффициента избытка воздуха, его подогрева, начальной температуры дожигательной насадки и некоторых других факторов.

Степень выгорания газа ($\epsilon = 1 - \frac{Q_3}{Q_H}$) в опытах являлась определяемым критерием при изучении процесса. Одним из важнейших определяющих критериев в процессе дожигания бедного газа является критерий E/RT , характеризующий температурную зависимость скорости реакции горения. В качестве определяющей температуры для этого критерия должна быть выбрана температура в слое дожигательной насадки. Эта зависимость позволяет определить величину энергии активации при сгорании бедного газа, которая оказалась равной $E \approx 6000$ ккал/моль.

Эта величина, по существу, является определяющим множителем в экспериментально найденной критериальной зависимости степени выгорания газа:

$$\epsilon = f\left(\frac{E_A}{RT}\right)$$

Несколько пониженное ее значение против известных величин энергии активации при горении элементарных горючих газов, по-видимому, отвечает некоторой активирующей роли дожигательной насадки.

ПРОМЫШЛЕННАЯ УСТАНОВКА ПО ДОЖИГАНИЮ БЕДНОГО ГАЗА И РЕЗУЛЬТАТЫ ОПЫТОВ

Промышленная установка состоит из дожигательного устройства, воздухоподогревателя, пароперегревателя низкого давления, автоматически управляемой газовой за-

движки и трубопроводов: газа, воздуха, пара и продуктов сгорания.

Дожигательное устройство промышленной установки представляет собой цилиндрическую камеру, изготовленную из стального кожуха, обмурованную изнутри огнеупорным кирпичом.

Нижняя часть камеры предназначена для перемешивания встречных струй нагретого воздуха с потоком поступающего для дожигания газа горячего дутья.

В верхней части дожигательной камеры размещается воздухоподогреватель, состоящий из 21 трубки жароупорной стали диаметром 34/38 мм. Все трубы воздухоподогревателя верхними своими концами укреплены в трубной доске, и на нижних концах труб насажены сопла диаметром 12 мм из жароупорной стали.

На нижних концах труб воздухоподогревателя, опираясь на сопла, подвешена дырчатая решетка, изготовленная из хромистого чугуна.

На этой решетке размещается слой шамотной крошки высотой 350 мм и размером зерен от 30 до 40 мм. Слой насадки из огнеупорного материала с малым коэффициентом теплоусвоения является достаточно надежной тепловой изоляцией зоны горения бедного газа и способствует быстрому достижению в этой зоне достаточно высокой температуры.

Холодный воздух с температурой около 25—30° С поступает в трубки воздухоподогревателя навстречу потоку раскаленных продуктов сгорания и проходит в трубах слой раскаленной насадки.

Вследствие малого количества воздуха, потребного для сжигания бедного газа, воздух успевает нагреваться до температуры, близкой к температуре слоя раскаленной насадки. Благодаря большому количеству струй малого диаметра, направленных навстречу потоку дожигаемых газов, воздух хорошо перемешивается с газом. Готовая газовоздушная смесь поступает через дырчатую решетку в слой дожигательной насадки, где догорает, развивая достаточно высокую температуру. Продукты сгорания из дожигательной камеры через соединительный патрубок направляются в пароперегреватель, где отдают часть своего тепла для перегрева пара и покидают установку. Пар низкого давления 0,7 атм с температурой 105° С поступает по трубкам перегревателя навстречу потоку уходящих продуктов сгорания.

Дожигательная камера отдельным трубопроводом приключена к трубопроводу водяного газа из генератора. На подводящем трубопроводе установлена автоматическая задвижка с водяным охлаждением, задвижка сблокирована с автоматической задвижкой первичного воздуха генератора водяного газа так, что обе задвижки открываются и закрываются одновременно.

Дозировочная задвижка для подачи воздуха в дожигательное устройство открывается и закрывается вручную в период, установленный фазовым режимом продувки генератора.

В отличие от лабораторной установки в промышленной установке дожигание газа происходило в условиях периодического режима.

Дожигательное устройство оборудовано взрывной панелью в камере смещения и взрывным клапаном в верхней части дожигательной камеры над насадкой.

Все дожигательное устройство, равно как и газопровод газа горячего дутья, футеровано изнутри шамотным кирпичом, а наружная поверхность покрыта слоем изоляции.

С целью начального разогрева насадки и увеличения периода дожигания газа был изменен режим работы генератора: фаза воздушного дутья была увеличена с 80 до 120 сек. Это привело к повышению температуры продувочного газа генератора до 950° С, и температура слоя насадки поднялась до 700° С. Помимо повышения температуры газа путем увеличения периода фазы горячего дутья генератора соответственно был увеличен период подачи вторичного воздуха в смесительную камеру с 64 до 105 сек. Одного такого измененного цикла работы газогенератора оказалось вполне достаточно для того, чтобы бедный газ, проходя насадку, воспламенился и температура в слое насадки быстро поднялась. Второй цикл работы генератора был переведен на нормальный режим и на накаленной насадке до температуры 900—950° С, в дальнейшем вполне надежно обеспечивался процесс дожигания продувочного газа. В течение небольшого промежутка времени температура в слое насадки достигала до 1 100 ÷ 1 160° С и в дальнейшем поддерживалась на этом уровне, снижаясь в период отключения подачи газа и воздуха в установку на 100—150° С. При этом температура поступающего газа из генератора составляла 680 ÷ 700° С, а перед дожигательной насадкой 420° С.

Как уже отмечалось, промышленная установка в отличие от экспериментальной установки работала прерывисто

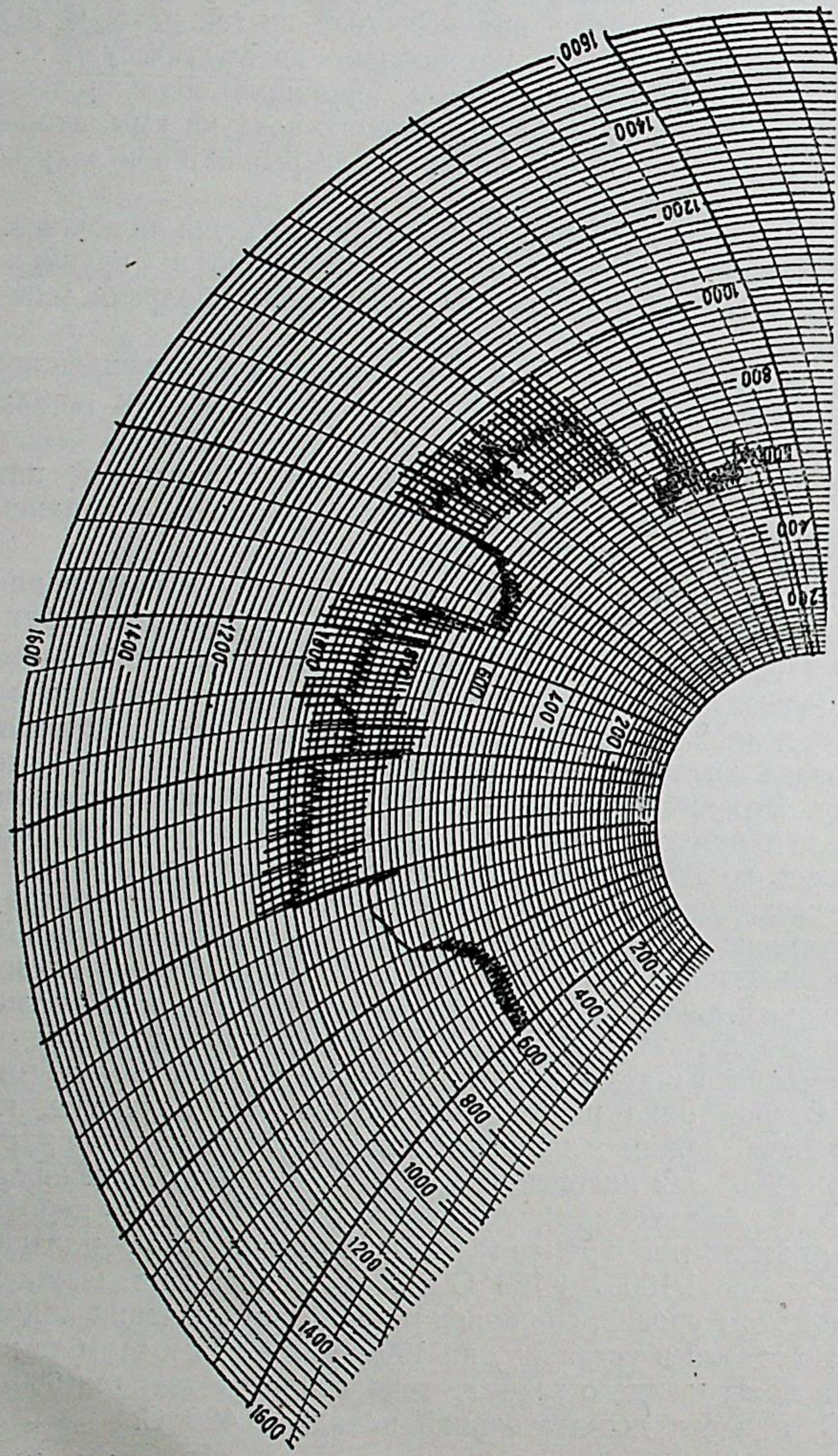


Рис. 5. Диаграмма изменения температур в слое дожигательной насадки.

Результаты испытания промышленной установки по дожиганию газа воздушной продувки генераторов водяного газа

Поступающий газ для дожигания		Продукты сгорания										Тепловое на- пряжение слоя насадки, ккал/м ² ·ч	Газы, %				
Состав		Состав				Температура, °С		Температура до- жигаемого слоя, °С		Количество, м ³ /ч	Температура до- жигаемого слоя, °С			Коэффициент набывка воздуха			
CO	H ₂	CO ₂	O ₂	CO	H ₂	CO ₂	O ₂	Температура, °С	Теплотворная способность, ккал/м ³			Температура над слоем, °С	Температура до- жигаемого слоя, °С				
8,5	2,3	14,4	0,2	74,6	525	310	0,0	0,0	20,4	1,6	78,0	1,08	720	1 120	2 430	2,9·10 ⁶	100
8,6	2,8	14,0	0,0	74,6	525	322	0,0	0,0	20,6	1,2	78,2	1,06	720	1 120	2 800	3,5·10 ⁶	100
4,9	0,22	17,4	0,0	77,48	505	153	0,0	0,0	18,6	2,4	79,0	1,13	695	980	2 725	1,6·10 ⁶	100
11,9	1,7	14,8	0,0	71,6	530	403	0,0	0,0	19,3	1,6	79,1	1,09	765	1 000	2 720	4,2·10 ⁶	100
4,3	2,5	14,6	0,2	78,4	530	194,5	0,0	0,0	19,9	1,2	78,9	1,06	755	1 050	2 650	2,2·10 ⁶	100
10,2	2,2	15,0	0,2	72,4	545	364,6	0,0	0,0	19,8	1,4	78,7	1,02	770	1 060	2 650	3,7·10 ⁶	100
4,2	2,0	15,4	0,2	80,2	590	178,5	0,0	0,0	19,6	1,6	78,8	1,08	830	1 100	2 610	1,8·10 ⁶	100
7,6	2,8	15,6	0,0	74,0	585	302	0,0	0,0	19,4	1,8	78,8	1,09	795	1 005	2 630	3,1·10 ⁶	100
5,1	1,1	15,6	0,0	78,2	605	182,4	0,0	0,0	19,8	1,6	78,6	1,08	825	1 060	2 600	1,8·10 ⁶	100
7,6	1,4	15,4	0,0	75,6	610	266	0,0	0,0	19,4	1,8	78,8	1,09	840	1 110	2 590	2,7·10 ⁶	100
6,8	1,7	14,4	0,2	76,9	625	249	0,0	0,0	20,0	1,4	78,6	1,07	860	1 130	2 600	2,5·10 ⁶	100

только в период фазы горячего дутья генератора, и, несмотря на это, процесс горения был вполне устойчивым.

Проведенные испытания показали вполне надежное и практически полное выгорание горючих при сравнительно низкой температуре газа в смесительной камере около 420°C и теплотворной способности газа $120 \div 350 \text{ ккал/нм}^3$, что соответствует суммарному содержанию горючих в газе $4 \div 12\%$.

Устойчивый процесс горения наступал благодаря значительному повышению температуры насадки до 1160°C , которая в период отключения установки не успевала заметно охлаждаться и была вполне достаточной для воспламенения и устойчивого сжигания бедного газа.

Диаграмма, снятая при помощи электронного потенциометра (рис. 5), показывала, что в период отключения дожигателя газа температура в слое снижалась лишь на $150 \div 160^{\circ}\text{C}$ и характер падения и повышения температуры был постоянен. Наблюдаемые на диаграмме провалы соответствуют моменту прекращения подачи дожигательного воздуха, т. е. отключению установки.

В таблице представлены результаты одного из испытаний промышленной установки.

Как видно, полное выгорание продувочного газа происходило с весьма большим удельным тепловым напряжением слоя насадки, достигающим до $4,2 \cdot 10^6 \text{ ккал/м}^2 \cdot \text{ч}$. Этот факт является весьма важным, так как указывает на возможность создания компактных и дешевых устройств для сжигания бедного газа. Полученные удельные тепловые напряжения в промышленной установке значительно выше полученных в опытах на лабораторной установке и близки к тепловым напряжениям, получаемым при сжигании богатых газов.

Таким образом, испытания промышленной опытной установки полностью подтвердили все результаты опытов, полученных на лабораторной установке, с той лишь разницей, что в промышленной установке получены значительно более высокие удельные тепловые напряжения слоя дожигательной насадки, несмотря на периодичность процесса горения.

ВЫВОДЫ

1. Сжигание бедных газов имеет большое практическое значение, так как позволяет получить значительную экономию топлива в промышленности. Помимо этого, дожигание ряда уходящих газов с продуктами неполного сгорания топ-

лива позволяет устранить загрязнение воздушной атмосферы заводов отравляющей окисью углерода.

Сжигание бедных газов имеет также существенный научный интерес в связи с тем, что процесс горения газа происходит вблизи нижнего предела воспламенения.

2. В работе рассмотрены основы теории сжигания бедного газа и исследованы условия теплового воспламенения горючей смеси вблизи нижнего предела ее воспламенения.

На основании теоретических исследований предложено рациональное устройство для сжигания бедных газов.

3. Лабораторные исследования сжигания бедных газов, проведенные на специальном дожигательном устройстве, показали полную возможность сжигания бедных газов теплотворной способностью $100\text{—}300 \text{ ккал/нм}^3$ при следующих необходимых условиях:

а) полного предварительного перемешивания бедного газа со всем необходимым для горения воздухом;

б) высокого подогрева воздуха в условиях противоточной схемы теплообмена с продуктами сгорания;

в) дожигательной насадки, состоящей из слоя огнеупорной керамической крошки с малым коэффициентом теплопроводности и малым коэффициентом теплоусвоения;

г) теоретической температуры горения газа не ниже $900 \div 1000^{\circ}\text{C}$.

4. Условия дожигания бедного газа в слое дожигательной насадки существенно облегчаются при условии предварительного раскаления насадки до возможно более высокой температуры.

5. На основании лабораторных исследований получена зависимость степени выгорания газа от температур поступающего газа в слое дожигательной насадки и от теоретической температуры сгорания газа.

Энергия активации в критериальной зависимости степени выгорания бедного газа от температуры в слое дожигательной насадки оказалась равной около 6000 ккал/моль .

6. На основании лабораторных исследований дожигания бедных газов была запроектирована промышленная установка для дожигания бедного газа в условиях периодического его поступления. Испытания промышленной установки полностью подтвердили все результаты опытов, полученных на лабораторной установке, и показали возможность дожигания бедного газа в периодических условиях его поступления. Выгорание бедного газа теплотворной способностью до 350 ккал/нм^3 происходит с высоким удельным тепловым на-

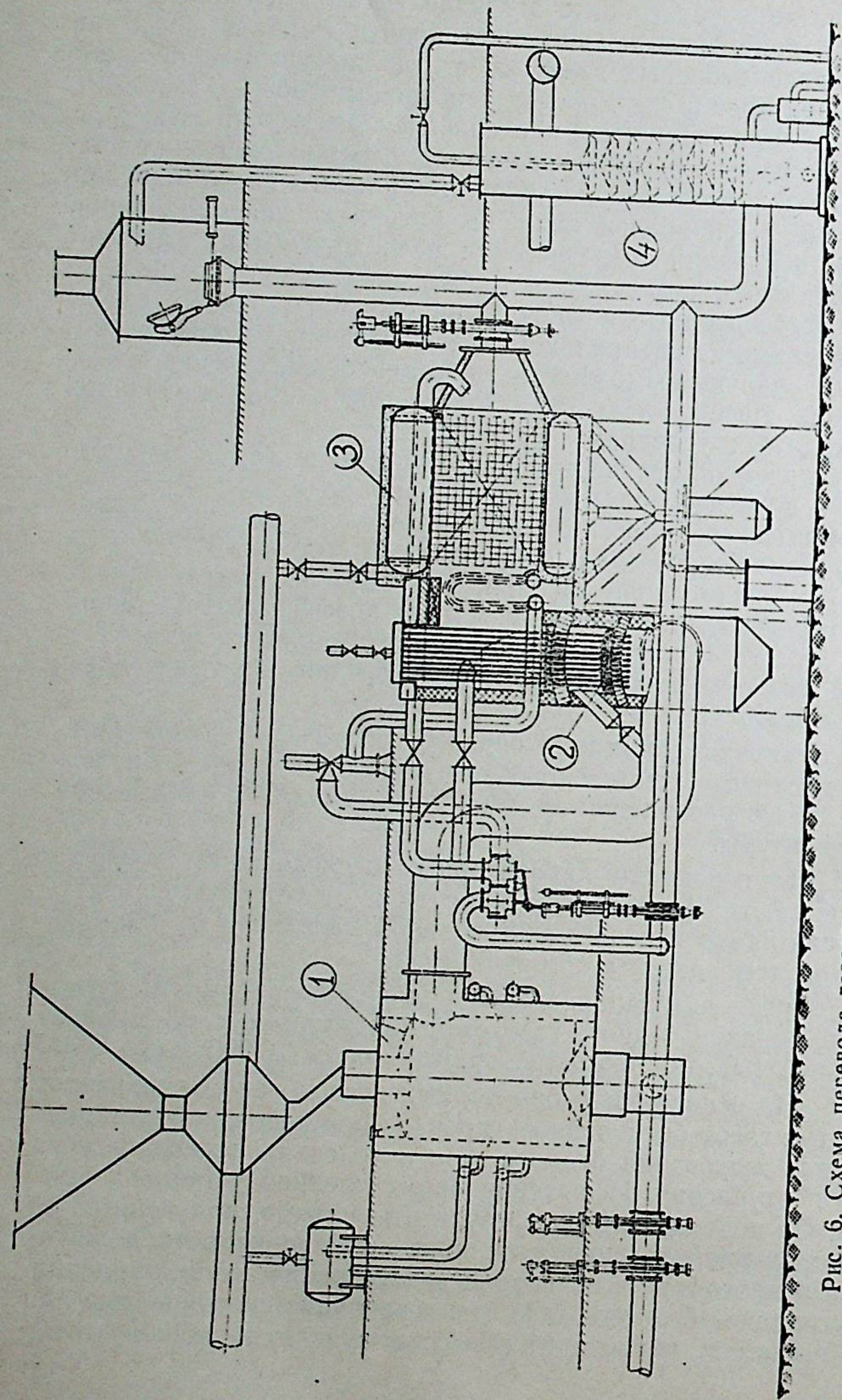


Рис. 6. Схема перевода газогенератора водяного газа на работу с дожиганием газа горячего дутья.
 1 — газогенератор; 2 — дожигательная камера; 3 — котел-утилизатор; 4 — скруббер.

пряжением в слое дожигательной насадки, достигающим до $4,2 \cdot 10^6$ ккал/м² · ч. Этот весьма важный опытный факт указывает на возможность создания компактных и дешевых устройств для сжигания бедных газов.

7. В результате всех исследований, проведенных в лабораторных и промышленных условиях, была запроектирована принципиальная схема (рис. 6) перевода работы газогенератора водяного газа на работу с дожиганием продувочного газа. Схема эта одобрена промышленностью и принята к внедрению.

Материалы диссертации опубликованы в виде статьи в журнале «Газовая промышленность», 1957, № 4.

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
Введение	3
Особенности теплового режима при горении бедного газа	4
Аэродинамические особенности процесса при- готовления горючей смеси	7
Экспериментальная установка	7
Результаты опытов и их обсуждение	10
Промышленная установка по дожиганию бед- ного газа и результаты опытов	15
Выводы	20