

Министерство образования и науки Российской Федерации
Национальный исследовательский Томский политехнический университет
Физико-технический институт
Кафедра технической физики

УТВЕРЖДАЮ
Директор ФТИ
О.Ю. Долматов
«__» _____ 2016г.

ФИКСАЦИЯ АТМОСФЕРНОГО АЗОТА В ВЧ ФАКЕЛЬНОМ ПЛАЗМОТРОНЕ

Методические указания к лабораторному практикуму по курсу
Плазменные технологии переработки веществ
для студентов направления 14.03.02 «Ядерная физика и технологии»
Физико-технического института

1. Цель работы

1. Расчет и оптимизация плазмохимического процесса фиксации атмосферного азота.
2. Ознакомление с устройством и принципом действия ПЗХУ.
3. Экспериментальные исследования режимов фиксации атмосферного азота.
4. Обработка и анализ результатов измерений NO, выбор оптимальных режимов фиксации атмосферного азота.

2. Промышленное получение оксида азота (II)

В плазме воздуха, нагретого до 3000—3500 К, содержится 5 % (по объему) оксида азота (II). Охладив плазму до комнатной температуры получают нитрозные газы, пригодные для последующей переработки в азотную кислоту. Этот принцип лежит в основе плазмохимического и электродугового методов фиксации атмосферного азота. Простота и малое число стадий и практически неограниченная сырьевая база (воздух) привлекли к нему внимание ученых, инженеров и промышленников еще в конце XIX — начале XX в. В эти годы проводились интенсивные инженерные разработки, в результате которых были созданы конструкции электродуговых печей и построены промышленные установки.

Для получения оксида азота (II) способом Биркеланда — Эйде использовалась дискообразная дуга, создаваемая электрическим разрядом постоянного тока, помещенным в сильное продольное магнитное поле. Воздух, пройдя через дугу, нагревался до высоких температур, при этом образовывалось около 1 % (по объему) оксида азота (II). Для снижения температуры газа с 900—1000 К до 500 К применяли рекуперативный котел, затем нитрозные газы охлаждали в водяном холодильнике до 293 К и подавали на доокисление и абсорбцию. Оставшийся после абсорбции оксид азота (IV) поглощали известковым раствором. Мощность дуги 500 кВт. Большая часть получаемой кислоты перерабатывалась в нитрат кальция (кальциевая, или норвежская, селитра). Подобная установка была построена в Норвегии, причем использовалась дешевая электроэнергия гидроэлектростанций. В 1908 г. производительность ее была доведена до 7000 т связанного азота.

Сотрудники Баденского анилиносодового завода (BASF) О. Шенхерр и А. Герссбергер создали в 1905 г. еще одну конструкцию дуговой печи для нагрева воздуха. Рабочий канал этой печи представлял собой вертикальную стальную трубу длиной 7—8 м, являющуюся одним из электродов. Второй электрод установлен у места подачи воздуха в рабочий канал. Воздух вводился тангенциально и двигался вдоль дуги по спиральной траектории, что способствовало фиксации дуги по геометрической оси канала. При включении тока между электродом и стальной трубой образуется короткая жесткая дуга, вытягиваемая затем в длину вдоль оси трубы. Напряжение питания было немногим больше 1000 В.

Перед началом и во время первой мировой войны в Германии были созданы два завода, где применялись методы Биркеланда — Эйде и Шенхерра для получения оксида азота (II). Общая производительность этих заводов составляла 28 000 т связанного азота в год при электрической мощности 210000 кВт.

Еще одна установка, функционировавшая в годы первой мировой войны в Германии и Франции, была разработана Г. Паулингом. Электрическая дуга зажигалась между двумя согнутыми V-образно трубчатыми электродами в точке, где расстояние между ними было минимальным. Поток воздуха перемещал дугу вдоль электродов, удлиняя ее вплоть до разрыва, после чего дуга поджигалась вновь.

Эти способы просуществовали до конца 20-х — начала 30-х годов, после чего были вытеснены более производительными и экономичным аммиачным способом. За прошедшие пятьдесят лет производство аммиака было во многом усовершенствовано. Созданы крупнотоннажные, автоматизированные безотходные установки с энерготехнологическим циклом, в которых потребление электроэнергии извне сведено к минимуму. Однако, несмотря на экономические преимущества, синтез аммиака имеет ряд недостатков, вынуждающих искать другие более эффективные методы фиксации азота. К числу недостатков относятся:

1. Сложность производства, включающего стадии получения азотоводородной смеси, аммиака и, наконец, сжигание последнего для получения оксида (II).

2. Необходимость в специальной аппаратуре и машинах, работающих под высоким давлением.

3. Значительная металлоемкость.

4. Громоздкость производства с густой сетью подземных и наземных коммуникаций.

5. Обязательное наличие высококвалифицированного обслуживающего персонала.

6. Значительные капиталовложения.

7. Большая потребность в дешевом исходном углеводородном сырье — природном газе, нефти или твердом топливе.

Последнее особенно ярко проявилось в конце 70-х — начале 80-х годов, когда в капиталистических странах разразился энергетический кризис. Ограниченность собственных запасов нефти и газа и возросшая стоимость импорта этих продуктов вынудили некоторые капиталистические страны, в том числе США, пойти на ввоз аммиака извне.

К настоящему времени сложилась устойчивая тенденция к снижению стоимости электроэнергии, вырабатываемой атомными электростанциями, в то же время стоимость природных углеводородов растет, поскольку мировые запасы их убывают. Таким образом, разработка плазмохимической технологии получения оксида азота (II) из воздуха приобретает большое народнохозяйственное значение.

Влияние технологических параметров на показатели процесса. Поиску оптимальных условий проведения процесса, позволяющих получать максимальные концентрации оксида азота (II) в нитрозных газах при минимальном уровне энергозатрат, посвящено множество теоретических и экспериментальных исследований советских и зарубежных ученых. Рассмотрим их основные результаты.

Влияние давления и температуры на равновесную объемную долю оксида азота (II) приведено на рис. 1. При атмосферном давлении максимальную объемную долю оксида азота (II) в газе получают в интервале температур 3300—3600 К. Выше этих температур идет термическое разложение продукта, ниже — продукт образуется в меньшем количестве. На основании этого рисунка можно сделать еще один вывод — достаточно медленное охлаждение газовой смеси от 3500 до 2000 К должно привести к разложению N_2O , поэтому непременной составляющей плазмохимической технологии должна быть стадия быстрого охлаждения продукта — закалка. Повышение давления способствует увеличению объемной доли оксида азота (II). Очевидно, что увеличение объемной доли за счет повышения давления ограничено лишь возможностями плазменной техники.

Сопоставление результатов термодинамического расчета с экспериментальными данными приведено на рис. 2. Опыты проводились на лабораторных установках мощностью от 2,5 до 50 кВт и на укрупненных опытно-промышленных установках мощностью 500—2500 кВт. Теоретическая 1 и экспериментальная 2 кривые не совпадают. В области низких (меньших 3000

К) и высоких (больших 4500 К) температур объемные доли оксида азота (II), определенные экспериментально, выше расчетных. Этот факт связан с некоторыми особенностями процесса.

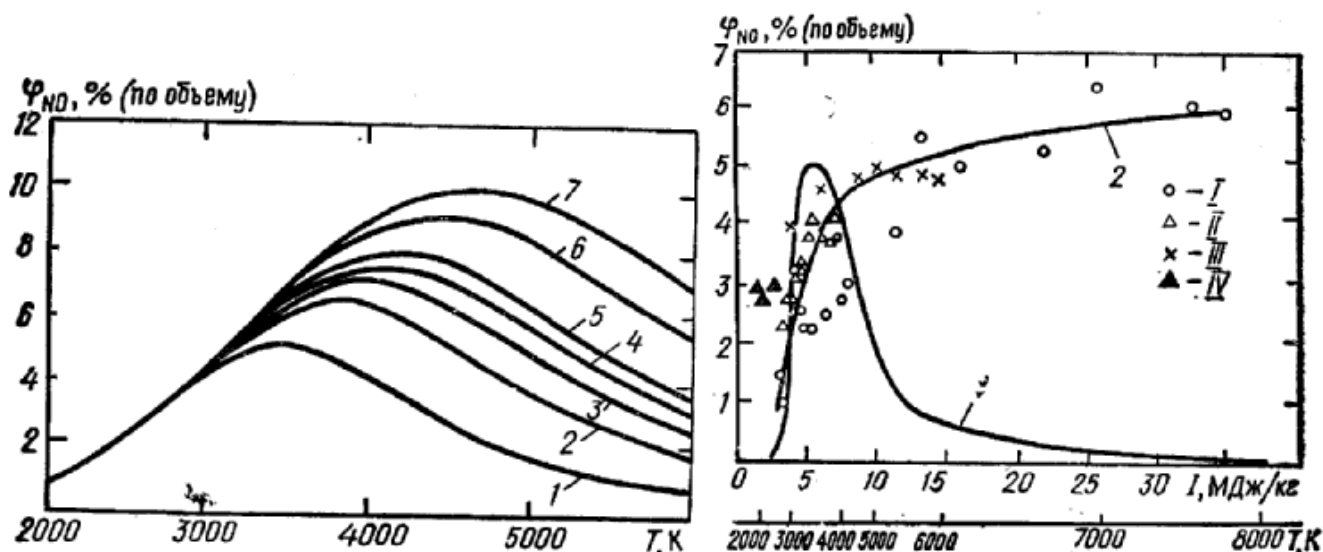


Рис. 1. Зависимость равновесной объемной доли NO от температуры при давлении:

1 — $P = 0,0981$ МПа; 2 — $P = 0,490$;
3 — $P = 0,981$; 4 — $P = 1,471$; 5 — $P = 1,961$;
6 — $P = 4,903$; 7 — $P = 9,807$ МПа.

Рис. 2. Сопоставление экспериментальных и расчетных данных:

1 — равновесие (расчетные данные);
2 — экспериментальные данные

Первая из них заключается в том, что оксид азота (II) при комнатных температурах термодинамически неустойчив, и достаточно медленное охлаждение нитрозных газов обуславливает его разложение. Во избежание этого применяют быстрое охлаждение газов — закалку. Содержание оксида азота (II) в газе значительно зависит от скорости закалки. Так, при темпе охлаждения $9 \cdot 10^4$ К/с равновесная концентрация сохраняется только на 47 % (синтез проводится при 3000 К), в то время как при охлаждении со скоростью $5 \cdot 10^7$ К/с продукт сохраняется полностью. Однако высокая скорость закалки не всегда приводит к положительному результату. Если синтез ведут при температурах 4500—7500 К, когда равновесная концентрация оксида невелика, целесообразно вначале медленно снизить температуру до 3500 К, чтобы за время охлаждения образовался оксид с максимально достижимой концентрацией, после чего включается быстрая закалка. По-видимому, этим условиям отвечает высокотемпературный участок экспериментальной кривой.

Другая особенность процесса становится ясной после анализа равновесного состава воздуха. При 3500 К в воздухе содержится 15,1 % атомарного кислорода. В процессе охлаждения протекает вторичная реакция — атомарный кислород рекомбинируется в молекулярный, что приводит к перераспределению объемных концентраций веществ в нитрозных газах. С учетом вторичных реакций максимально возможная объемная доля NO в охлажденной смеси составляет 5,9 %.

Наконец, третья особенность, которую нужно учитывать при сопоставлении экспериментальных и расчетных данных, относится к точности фиксирования параметров синтеза. Один из основных параметров — энтальпия, которая при обработке опытных данных определяется как отношение полезной электрической мощности, вложенной в дугу, к количеству подаваемого газа. Теплота усредняется по всему потоку газа. В тоже время известно, что температура газа распределена по сечению струи неравномерно, в центре она составляет 7000—8000 К, а на периферии близка к 1000 К. Превышение экспериментально полученных концентраций над теоретически возможными при температурах,

меньших 3000 К, может быть отнесено за счет этой особенности. Другой основной параметр процесса — давление, также оказывающее большое влияние на объемную долю NO. Однако измерить его в зоне образования продукта практически невозможно.

Указанные особенности процесса не позволяют однозначно утверждать, что в опытах, приведенных на рис. 2 получены сверхравновесные объемные доли оксида азота (II), достоверен лишь тот факт, что содержание 5,5—6,0 % (по объему) оксида азота (II) в нитрозном газе вполне достижимо.

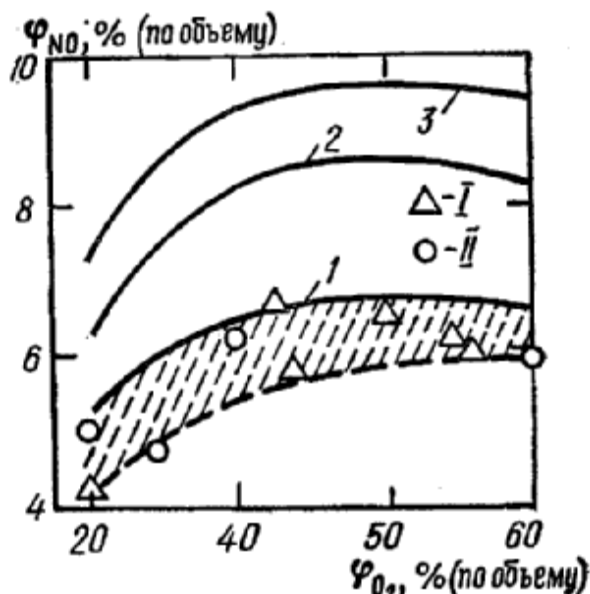


Рис. 3. Зависимость максимальной объемной доли NO от содержания кислорода в исходной смеси и давления:

1 — $P = 0,0981$ МПа (1 кг/см^2), $T = 3500$ К; 2 — $P = 0,490$ МПа (5 кг/см^2), $T = 3800$ К; 3 — $P = 0,981$ МПа (10 кг/см^2), $T = 4000$ К; I — экспериментальные данные Л. С. Полака и В. С. Щипачева, II — В. Д. Пархоменко и А. И. Руденко.

Таблица 1. Результаты исследования процесса получения оксида азота (II) из водяного пара

Сила тока, А	Мощность плазмотрона, кВт	Расход, л/мин		КПД плазмотрона	Температура (азотной плазмы), К	Объемная доля NO в газе, %	Выход NO кмоль/МДж
		азота	пара				
155	22,5	100	50	91,6	5700	1,96	0,0340
190	23,7	87	50	89,5	6000	2,47	0,0394
205	23,6	74	50	86,7	6200	3,23	0,0428
250	23,0	54	50	78,0	6400	4,44	0,0502
295	24,15	41	50	82,0	6900	5,02	0,0391
315	23,3	32	50	75,9	7100	5,52	0,0397
338	21,9	21	50	65,7	7500	8,42	0,0486
370	18,5	13	50	52,4	7700	12,1	0,0699

Приведенные выше данные относятся к синтезу оксида азота (II) из воздуха, результаты синтеза из смесей азота с кислородом приведены на рис. 3. Здесь кривые — данные термодинамических расчетов, точки — экспериментальные данные. Заштрихована область разброса экспериментальных данных. Как видно, максимальные концентрации могут быть получены при соотношении $N_2 : O_2 \approx 1$ и повышенном давлении.

Другим возможным источником кислорода для синтеза оксида азота (II) в плазме может служить водяной пар. Неиспользованная для синтеза вода после охлаждения конденсируется, за счет чего повышается объемная доля оксида азота (II) в нитрозных газах. В таблице 1 приведены некоторые экспериментальные результаты, полученные при подаче водяного пара в поток азотной плазмы. Объемная доля оксида азота (II) достаточно велика, недостатком процесса является низкий энергетический выход.

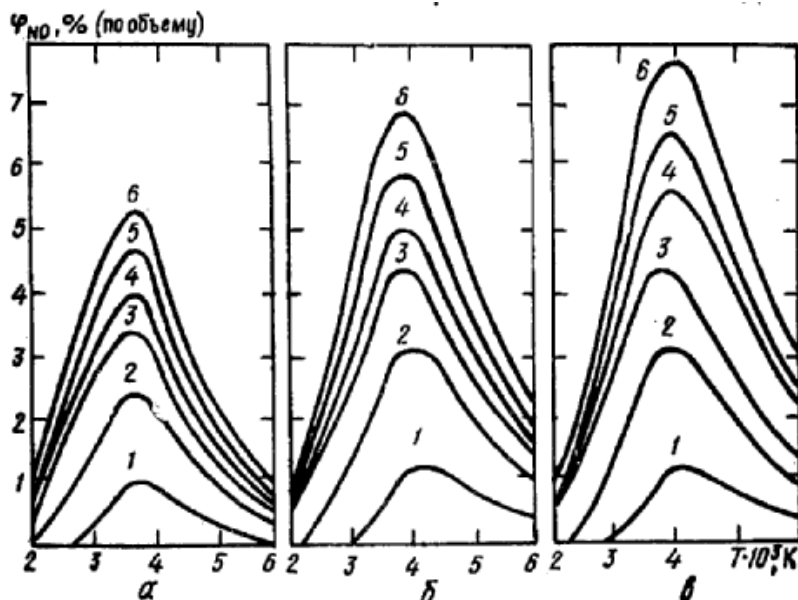
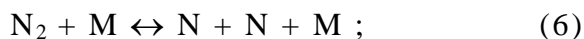
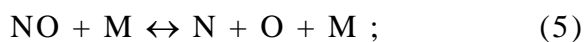
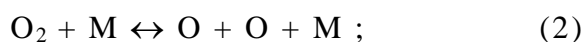
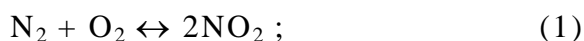


Рис. 4. Зависимость равновесной объемной доли NO от температуры, состава газа и давления (система С-Н-О-Н):

а — 10^5 Па; б — $5 \cdot 10^5$ Па; в — 10^6 Па; для кривых 1 — 6 соотношения $\text{CH}_4 : \text{O}_2 : \text{N}_2$, равны соответственно 20 : 20 : 80; 20 : 40 : 60; 5 : 20 : 75; 10 : 40 : 60; 1 : 20 : 80; 5 : 60

Затраты электроэнергии на нагрев азотно-кислородной смеси могут быть снижены путем добавок в нее углеводородов. На рис.4 приведены результаты термодинамического расчета, характеризующие зависимость равновесной объемной доли оксида азота (II) для метано-кислородно-азотных смесей. С увеличением добавок метана снижаются энергозатраты, но одновременно уменьшается концентрация NO, за счет чего общие затраты электроэнергии на получение 1 т азотной кислоты возрастают до 144 ГДж при соотношении: $\text{CH}_4 : (\text{O}_2 + \text{N}_2)$ равном 0,5. Кинетика процесса. Кинетика образования и разложения оксида азота (II) при высоких температурах базируется на следующих обратимых химических реакциях



где M — любая частица, участвующая в реакции.

В работах советских ученых показано, что цепной неразветвленный механизм, включающий реакции (3) и (4), описывает процесс достаточно полно. Концентрация атомарного кислорода, являющегося инициатором цепного процесса, остается постоянной и определяется равновесием реакции (2). Скорость образования оксида азота (II) в этом случае определяется по уравнению:

$$\frac{dC_{NO}}{dt} = 1,5 \cdot 10^{13} e^{-\frac{360340}{RT}} \cdot \frac{(C'_{NO})^2 - (C_{NO})^2}{\sqrt{Co_2}}$$

где C_{NO} и Co_2 , — текущие концентрации; C'_{NO} — равновесная концентрация.

Характерное время реакции t_p , за которое устанавливается равновесная концентрация оксида азота (II), определяется по формуле

$$t_p = \frac{5 \cdot 10^{11} \exp\left(-\frac{360340}{RT}\right)}{\sqrt{Co_2}} C'_{NO}$$

Результаты расчета по этой формуле приведены на рис. 5.

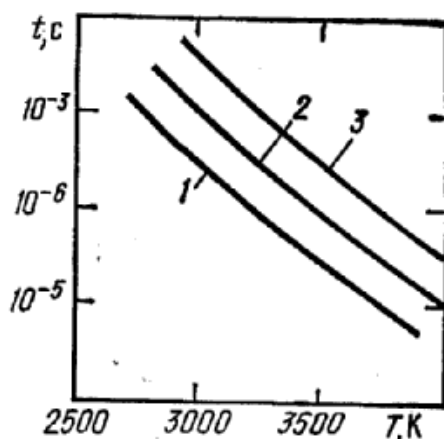


Рис. 5. Время установления равновесной концентрации при получении оксида азота (II) при давлениях, МПа : 1 — 0,0981; 2 — 0,981; 3 — 9,81.

Скорость разложения оксида азота (II) можно вычислить по уравнению)

$$-\frac{dC_{NO}}{dt} = 5 \cdot 10^{13} \frac{(C_{NO})^2}{\sqrt{Co_2}} e^{-\frac{360340}{RT}}$$

Закалка оксида азота (II). Выше уже указывалось, что для сохранения концентрации оксида азота (II), полученного при высоких температурах, необходима закалка. Рассмотрим зависимость времени полного разложения оксида азота (II) от температуры при атмосферном давлении:

Температура, К	Время, с	Температура, К	Время, с
1000	$2,2 \cdot 10^{12}$	2300	$5,3 \cdot 10^{-3}$
1700	140	3000	$7,8 \cdot 10^{-5}$
2000	1	4000	$7,2 \cdot 10^{-7}$

С увеличением температуры стабильность оксида азота (II) резко уменьшается, и при 2300 К время его существования близко к длительности реакции синтеза. Это подтверждает высказанную ранее гипотезу о том, что скорость закалки должна изменяться во времени. Если предположить, что разложение NO при закалке происходит равномерно и степень его распада составляет 5 %, т. е.

$$\frac{dC_{NO}}{dT} = const = \frac{0,05C'_{NO}}{T_H - T_R},$$

то оптимальную скорость закалки можно вычислить по уравнению

$$\frac{dT}{dt} = 1,5 \cdot 10^{13} \exp\left(-\frac{360340}{RT}\right) \frac{[(C'_{NO})^2 - (C_{NO})^2](T_H - T_K)}{\sqrt{Co_2}}$$

где T_H и T_K — температуры в начале и в конце закалки.

Расчеты по этому уравнению показывают, что при $T_H=3000$ К начальная скорость охлаждения должна быть равна нулю, затем при температуре на 200—300 градусов меньшей начальной она должна возрасти до $5 \cdot 10^6$ К/с, после чего снизиться до 10^4 К/с при 1800 К.

В настоящее время разработаны различные методы закалки оксида азота (II): охлаждением в теплообменниках; впрыском жидкости; смешением с холодным газом; расширением в сопле Лавала; в кипящем слое инертных частиц; магнитно-гидродинамический метод, при котором избыток теплоты нитрозных газов переводится в электроэнергию. Характеристики некоторых методов, полученные экспериментально, приведены в табл. 2.

Таблица 2. Эффективность некоторых методов закалки оксида азота (II)

Метод закалки	Объемная доля оксида азота (II) в смеси на выходе из реактора, %	Термодинамическая объемная доля оксида азота (II) на выходе из реактора, %	Выход оксида азота (II) моль/МДж
В водном трубчатом теплообменнике	4,27 – 4,37	5,36	0,375 – 3,383
Распыленной водой	4,86 – 4,93	5,36	0,416 – 0,433
Распыленным 10%-м раствором азотной кислоты	6,06 – 6,18	6,80	0,416 – 0,422
Холодной азотно-кислородной смесью 30% кислорода	2,52 – 2,6	2,44	0,486 – 0,50
Распыленным 20%-м раствором азотной кислоты	7,22 – 7,35	8,35	0,411 – 0,416
Частью охлажденного нитрозного газа, рециркулирующего в системе	4,35 – 4,42	5,36	0,380 – 0,389

Технологические схемы получения оксида азота (II). На получение оксида азота (II) расходуется лишь незначительная часть теплоты, подведенной к плазме, остальная часть содержится в отходящих горячих реакционных газах. Использование этой теплоты значительно снижает энергозатраты на

производство оксида азота (II), поэтому технологические схемы содержат соответствующее теплотехническое оборудование.

На рис. 6 приведена технологическая схема получения азотной кислоты, предложенная сотрудниками Государственного научно-исследовательского и проектного института азотной промышленности и продуктов органического синтеза (ГИАП). Отличительная особенность схемы — замкнутый технологический цикл, газообразные выбросы в атмосферу отсутствуют. Другая особенность — в использовании азотно-кислородной смеси с соотношением $N_2 : O_2 = 50 : 50$. Схема предназначена для плазмотронов, работающих под давлением 1 и 10 МПа. Исходные газы сжимаются компрессором 10 и после смешения с рециркулирующими газами в коллекторе 7 проходят в рекуператоры 6, где нагреваются до 2000 К, забирая теплоту от огнеупорной насадки а затем поступают в плазмотрон 1. В плазмотроне азотно-кислородная смесь нагревается до 3000—3500 К при этом образуются нитрозные газы, содержащие 7,6—8,9 % (по объему) оксида азота (II). Газы подвергаются закалке в закалочном устройстве 2. Температура газов после закалки 2100 К, что достаточно для нагрева насадки в рекуператорах 6. После рекуператоров нитрозные газы поступают в котел-утилизатор (КУ) 5 и выходят оттуда с температурой 475 К. В КУ избыток теплоты расходуется на получение водяного пара. Часть охлажденных нитрозных газов в количестве 0,93—1,12 м³/м³ подается компрессором 3 на закалку, остальные газы, пройдя водяной холодильник 4, подаются в абсорберы 9, где происходит доокисление NO до NO₂ и поглощение последнего водой с образованием азотной кислоты. После абсорбции газы, содержащие незначительное количество оксидов азота (II), подаются компрессором 8 в смешительный коллектор 7 на рециркуляцию.

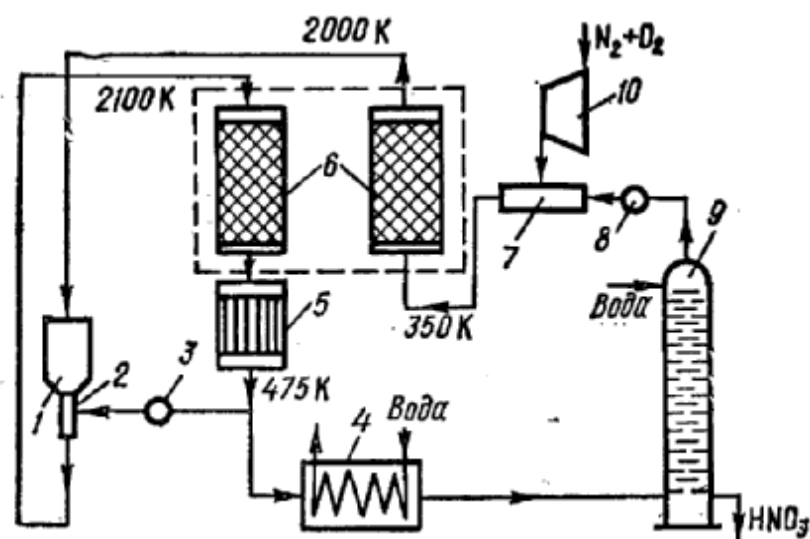


Рис. 6. Технологическая схема получения азотной кислоты плазмохимическим методом.

Энерготехнологическая схема получения оксида азота (II), разработанная в США, приведена на рис. 7. Закалка продукта реакции осуществляется за счет перехода тепловой энергии газа в кинетическую при расширении газа в сопле Лавалья, частично теплота отводится через стенки сопла за счет испарения жидких азота и кислорода поступающих затем в реактор. Кислород подается в поток азотной плазмы. Нитрозные газы, расширившись в сопле Лавалья, поступают в газовую турбину, вращающую генератор постоянного тока. Электроэнергия, выработанная генератором, возвращается для подпитки плазмотрона.

Плазмохимический метод получения оксида азота (II) и на его основе азотной кислоты отличается простотой технологии и аппаратуры, при этом не потребляется углеводородное сырье, а стоимость 1 т азотной кислоты в ряде районов Советского Союза близка к стоимости кислоты, полученной аммиачным методом. В то же время производительность единичного агрегата аммиачного метода значительно выше. Для создания крупнотоннажного производства этой продукции мощность плазмотронов должна составлять 100 МВт. Такие плазмотроны находятся еще в стадии разработки. Для разрешения возникающих при этом новых научных и инженерных проблем в нашей стране и за рубежом построены мощные опытные установки, предназначенные для испытаний и отработки плазмохимического метода. Решение этих проблем откроет перспективы к широкому использованию его в промышленности.

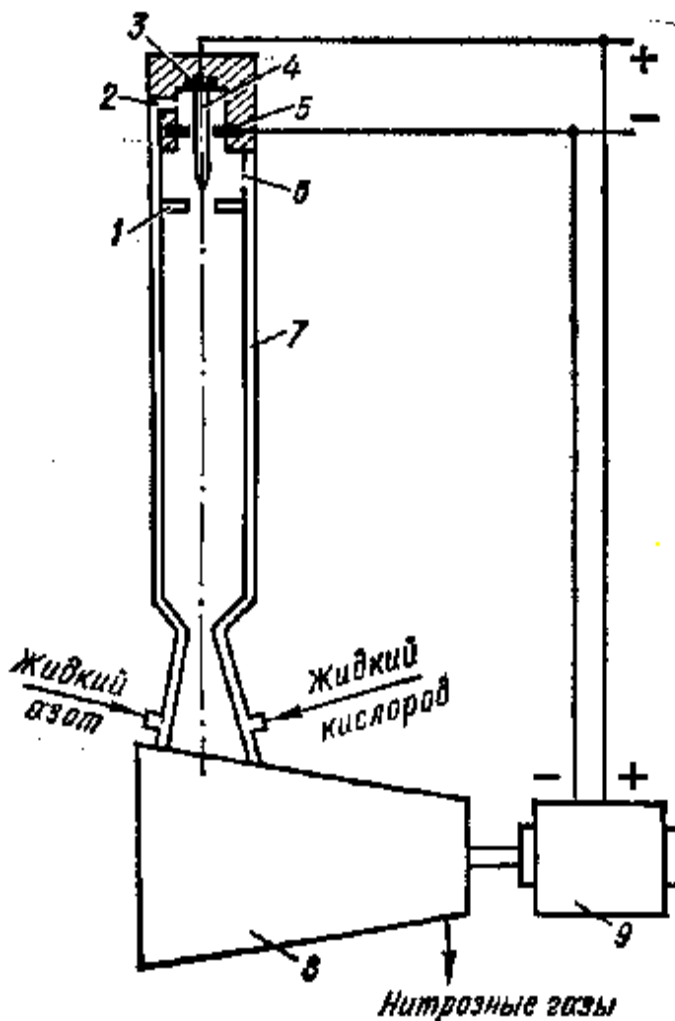


Рис. 7. Энерготехнологическая схема получения оксида азота (II).

3. Описание установки.

Установка для фиксации атмосферного азота (см. рис. 8) состоит из высокочастотного генератора 1 (источника питания) и технологического блока 2.

Высокочастотный генератор ВЧГ8-60/13 размещён в экранированном металлическом шкафу, обеспечивающем надёжную защиту от электромагнитного излучения. Основные технические характеристики генератора ВЧГ8-60/13 приведены в таблице 3.

Таб. 3. Технические характеристики ВЧГ 8-60/13

ВЕЛИЧИНА	Ед. изм.	Значение
Напряжение питающей сети	В	380
Частота питающей сети	Гц	50
Потребляемая мощность	кВт	90
Колебательная мощность	кВт	60±6
Рабочая частота	МГц	13,56±0,13
Коэффициент полезного действия	%	не менее 75
Напряжение анодное	кВ	10,4÷10,5
Ток анодный	А	7,6÷7,7
Ток сеточный	А	1,8
Расход охлаждающей воды	м ³ /ч	не менее 1,4

Технологический блок **2**, также как и генератор, выполнен в виде экранированного металлического шкафа, обеспечивающего надёжную защиту от электромагнитного излучения, включает следующие основные узлы: высокочастотный плазмотрон факельного типа **3**, реактор **4**, узлы «сухой» **5** и «мокрой» **6** очистки отходящих газов.

Высокочастотный плазмотрон **3** факельного типа предназначен для генерирования потоков неравновесной воздушной плазмы с температурой до 4000К.

В плазмотроне **3** в условиях неравновесной воздушной плазмы происходит процесс связывания атмосферного азота с образованием NO(II). Узел «сухой» очистки **5** отходящих газов от высокодисперсных механических примесей (пыль) включает 3 ступени прямооточных циклонов и обеспечивает очистку отходящих газов от этих примесей (96 ÷ 98 %).

Узел «мокрой» очистки **6**, включающий центробежно-барботажный аппарат, погружной водяной насос и вытяжной вентилятор, обеспечивает доочистку отходящих газов от высокодисперсных механических примесей (пыль) и вредных газообразных веществ.

Компрессор **7** предназначен для дозированной подачи плазмообразующего газа в высокочастотный факельный плазмотрон **3**.

Технологический процесс фиксации атмосферного азота осуществляется следующим образом. Поток воздушной неравновесной плазмы, генерируемый высокочастотным факельным плазмотроном **3**, подаётся на вход реактора **4**. на выходе из реактора газоанализатором КАСКАД-512.2 замеряется температура отходящих газов и содержание NO(II). Отходящие газы, содержащие в своём составе NO(II), высокодисперсные механические примеси (пыль), далее направляются в узел «сухой» очистки **5**, где происходит их доочистка от основной массы этих примесей. Затем отходящие газы направляются в узел «мокрой» очистки **6**, где происходит их окончательная очистка от механических примесей и вредных газообразных веществ. Очищенные отходящие газы выбрасываются в атмосферу.

4. ИНСТРУКЦИЯ

по охране труда при работе на опытном образце установки по плазменной утилизации шламов на базе высокочастотного генератора ВЧГ8-60/13

1. ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ.

1.1. К работе на установке по плазменной утилизации шламов (далее установка) допускаются лица, не моложе 18-ти лет, прошедшие медосмотр, инструктаж на рабочем месте, имеющие профессиональную подготовку, соответствующую характеру работ, прошедшие проверку знаний по вопросам охраны труда в Госгортехнадзоре России.

Периодичность повторного инструктажа один раз в квартал. .

1.2. Работники, осуществляющие пуско-наладочные, ремонтные работы, периодические плановые осмотры, а также отработку технологии утилизации шламов в электроустановках выше 1000В, должны иметь IV группу по электробезопасности, остальные работники – группу III.

1.3. Все виды работ на установке производятся группой не менее 2-х человек, один из которых имеет IV квалификационную группу по электробезопасности (напряжение выше 1000 В).

1.3.1. ЗАПРЕЩАЕТСЯ работать на установке одному человеку и оставлять включенную установку без присмотра.

1.4. Работы по наладке, настройке и регулированию технологических режимов работы установки производятся работниками в соответствии с настоящей инструкцией.

1.5. Все работы по наладке и настройке генератора производятся по письменному распоряжению и в соответствии с «Программой пуско-наладочных работ для генератора ВЧГ8-60/13».

1.6. Установка для плазмокаталитической утилизации нефтяных шламов состоит из высокочастотного генератора (источника питания) и технологического блока, которые размещены в металлических корпусах.

Таб. 1. Технические характеристики ВЧГ 8-60/13

Величина	Ед. изм.	Значение
Напряжение питающей сети	В	380
Частота питающей сети	Гц	50
Потребляемая мощность	кВт	90
Колебательная мощность	кВт	60±6
Рабочая частота	МГц	13,56±0,13
Напряжение анодное	кВ	10,4÷10,5
Ток анодный	А	7,6÷7,7
Ток сеточный	А	1,8
Расход охлаждающей воды	м ³ /ч	не менее 1,4

Технологический блок включает следующие основные узлы: высокочастотный плазмотрон факельного типа, реактор, узлы «сухой» и «мокрой» очистки отходящих газов.

Работа установки автоматизирована, управление работой всего технологического оборудования производится с пульта управления и контроля за технологическим процессом утилизации шлама, питание которого производится от сети переменного тока напряжением 380В.

1.7. Все работники должны соблюдать правила внутреннего трудового распорядка.

1.8. На рабочем месте возле установки должна быть вывешена краткая инструкция по охране труда, в которой для работников указываются основные требования по безопасным приемам работы, а также требования к защитным, предохранительным и блокировочным устройствам.

1.9. Работа на установке характеризуется следующими вредными и опасными факторами, воздействие которых на работников может привести к несчастному случаю:

- а) высокое напряжение;
- б) электромагнитное излучение;
- в) ультрафиолетовое излучение;
- г) световое излучение;
- д) воздействие вредных веществ (например, окислов азота, серы, углерода и т. п.)

Во избежание несчастных случаев каждый работник должен строго соблюдать требования правил, норм и инструкций.

Для создания безопасных условий труда предусмотрены следующие меры защиты:

1.9.1. Токоведущие части установки изолированы, в результате чего находятся в недоступных для работающих местах. «Поджиг» высокочастотного электрического разряда в плазмотроне, требующий прикосновения проводником к электроду, автоматизирован, что исключает случайное прикосновение персонала к электроду.

Металлические части установки, которые могут вследствие повреждения изоляции оказаться под напряжением, заземлены. Замер сопротивления контура заземления производится ежегодно.

1.9.2. Установка размещена в металлических корпусах, экранирующих электромагнитное и ультрафиолетовое излучение. ЗАПРЕЩЕНО во время работы установки, открывать двери генератора и технологического блока. При соблюдении указанных мер излучение не превышает допустимого.

1.9.3. Смотровое окно на дверях технологического блока установки должно быть оснащено экранирующей металлической сеткой.

1.9.4. Установка оснащена вытяжной системой вентиляции, системой мокрой очистки отходящих газов, защищающих работников от вредных газообразных и конденсированных веществ, образующихся в процессе работы.

1.10. Защитные ограждения (открывающиеся и съёмные) должны иметь электромеханические блокировки, автоматически отключающие подачу напряжения на установку при их открывании.

ЗАПРЕЩАЕТСЯ работать на установке при неисправных дверных блокировках, открытых дверях генератора и технологического блока установки.

1.11. Крепление блокировочных устройств должно быть надёжным, исключающим случаи самооткрывания.

1.12. В случае прекращения подачи электроэнергии, во время перерыва в работе или в аварийной ситуации установка должна быть отключена от питающей сети.

1.13. Периодические осмотры и планово-предупредительные ремонты генератора, производятся по графикам, утверждённым руководителем работ.

1.14. Осмотр и ремонтные работы на установке производить при её полном отключении от источников питания. При этом необходимы:

а) видимый разрыв в виде отключения разъединителя входного рубильника с последующим снятием предохранителей;

б) на приводах (рукоятках приводов) коммутационных аппаратов во избежании подачи напряжения на рабочее место должны быть вывешены плакаты «НЕ ВКЛЮЧАТЬ, РАБОТАЮТ ЛЮДИ»;

г) проверка отсутствия напряжения на отходящих кабельных линиях питающих установку;

д) заземление конденсаторных установок.

1.15. Установка должна быть обеспечена следующими защитными средствами:

а) штанга оперативная на напряжение до 35 кВ – 1 шт.;

б) указатель напряжения УВН-110 на напряжение до 20 кВ – 1 шт.;

в) клещи токоизмерительные К4570/1Ц – 1 шт.;

г) диэлектрические перчатки – 2 пары;

д) диэлектрические боты – 1 пара;

е) диэлектрические коврики 2 шт.;

ж) переносное заземление ЗПП-15 – 1 шт.;

з) защитные очки – 2 пары;

и) щипцы (пассатижи) – 1 шт.;

к) халаты – 2 шт.

1.16. Все работники обеспечиваются спецодеждой, спецобувью и средствами индивидуальной защиты.

1.17. Для обеспечения требований взрыво- и пожаробезопасности нефтешлам, необходимый для работы на установке, должен находиться в металлической бочке на 200 литров, надежно прикреплённой хомутом к технологическому блоку.

1.18. В случае травмирования работников необходимо оказать доврачебную помощь, если необходимо, вызвать скорую помощь по тел. 03, сообщить руководителю работ.

1.19. Запрещено принимать пищу на рабочем месте.

1.20. Лица, виновные в нарушении требований инструкций по охране труда, несут ответственность в соответствии с законодательством РФ.

2. ТРЕБОВАНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ПЕРЕД НАЧАЛОМ РАБОТЫ.

2.1. Привести в порядок рабочую одежду, застегнуть рукава, провести внешний осмотр установки, проверить наличие и надёжность заземления и защитных средств.

2.2. Проверить наличие и исправность:

- а) предохранительных устройств;
- б) блокирующих устройств;
- в) наличие напора воды в водопроводе;
- г) работу компрессоров;
- д) системы мокрой очистки отходящих газов;
- е) узла подачи шламов.

2.3. Результаты осмотра и принятые меры по ликвидации выявленных нарушений техники безопасности заносятся в рабочий журнал установки.

При осмотре обращать внимание:

а) на безотказность работы всех блокирующих устройств, обеспечивающих безопасные условия работы персонала, необходимую чёткость и очерёдность включения всех элементов генератора и установки в целом;

б) на надёжность экранирования и заземления корпуса генератора и технологического блока и компрессора;

в) на чистоту контактов пускорегулирующей аппаратуры;

г) на отсутствие пыли на токоведущих частях и изоляторах.

При обнаружении неисправностей блокировочных устройств до их устранения установку включать категорически ЗАПРЕЩАЕТСЯ.

2.4. Запрещается работать на установке при обнаружении каких-либо неисправностей работы оборудования, отсутствии защитных средств или истечении сроков их годности.

2.5. Необходимо внимательно ознакомиться с плановым заданием на проведение работ на установке, наличием и состоянием исходных материалов (сырья) и безопасным обращением с ними.

2.5.1. Проверить ёмкость для нефтешламов на отсутствие течи и надёжность крепления к технологическому блоку.

2.6. Персоналу до полного ознакомления с плановым заданием работ на установке категорически ЗАПРЕЩАЕТСЯ включать и выключать рубильники, выключатели, открывать и закрывать вентили, краны, открывать крышки приборов, крутить рукоятки и т.п.

3. ТРЕБОВАНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ВО ВРЕМЯ РАБОТЫ.

3.1. Для исключения аварийных ситуаций, для безопасного выполнения работ необходимо строго соблюдать указанную последовательность запуска установки:

3.1.1. Включить в генераторе автоматические выключатели F_1 , F_8 .

3.1.2. Поставить в генераторе переключатель мощности в положение 50 или 100 % (в соответствии с плановым заданием).

3.1.3. Закрыть все двери генератора и технологического блока.

3.1.4. Включить рубильник $Q1$ на генераторном блоке.

3.1.5. Включить рубильник на питающем щите, при этом включается вентилятор воздушного охлаждения генераторной лампы.

3.1.6. Подать охлаждающую воду общим краном на водяном коллекторе, при этом на генераторе загорится сигнальная лампа «ОХЛАЖДЕНИЕ».

3.1.7. Включить на генераторе первую ступень накала кнопкой S_2 . Через 40 с. кнопкой S_1 включить вторую ступень накала. Загорается белая сигнальная лампа «БЛОКИРОВКА АНОДНОГО НАПРЯЖЕНИЯ».

3.1.8. Поставить на генераторе тумблер S_{10} на генераторном блоке в положение «РУЧНАЯ РАБОТА».

3.1.9. Включить систему мокрой очистки отходящих из реактора газов.

3.1.10. Включить компрессор и подать в плазмотрон плазмообразующий газ.

3.1.11. Нажатием кнопки S_3 на генераторе включить «НАГРЕВ» и подать высокое напряжение на электрод плазмотрона, одновременно «поджечь» разряд в плазмотроне с помощью автоматического устройства.

3.1.12. Через 5 – 10 минут включить дозировочный насос и подать шлам в плазмохимический (плазмокаталитический) реактор.

3.2. Во время работы установки запрещается открывать, снимать ограждения, отключать предохранительные и блокирующие устройства. Все работы производить при закрытых дверях генератора и технологического блока.

3.3. Во время работы установки запрещено снимать крепление, предохраняющее от опрокидывания ёмкость, содержащую нефтешлам, работать с нефтешламом без резиновых перчаток.

3.3. Во время работы установки следить за индикаторными лампами «ОХЛАЖДЕНИЕ», «НАКАЛ», «НАГРЕВ» на генераторе и датчиками расхода плазмообразующего газа, охлаждающей воды и шлама на пульте управления технологического блока.

3.4. Периодически снимать режимные параметры работы установки и заносить их в рабочий журнал. При необходимости производить корректировку этих параметров в соответствии с плановым заданием.

3.5. Во время работы установки следить за сигнальной лампой режима «Работа», расположенной на пульте управления и контроля за технологическим процессом утилизации шлама, при сбое технологического режима, автоматически выключается режим «НАГРЕВ» генератора и электроприводы подачи шлама, что сопровождается сигналом звонка.

3.6. В случае возникновения аварийной ситуации: локальный прогар стенок реактора при «закорачивании» высокотемпературного канала высокочастотного факельного разряда на металлическую поверхность внутренних стенок реактора, протекание и возгорание шлама между внешними и внутренними стенками реактора – термомпара показывает всплеск температуры, необходимо выполнить требования п.4.

4. ТРЕБОВАНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ В АВАРИЙНЫХ СИТУАЦИЯХ.

4.1. В случае возникновения аварийной ситуации необходимо незамедлительно кнопкой «S₅» отключить подачу высокого напряжения на установку.

4.2. Отключить дозировочный насос и прекратить подачу шламов в реактор.

4.3. Кнопкой S₄ отключить накал генераторной лампы.

4.4. Не менее, чем через 10 минут после отключения накала, перекрыть кран на водяном коллекторе, подающим охлаждающую воду.

4.5. Не менее, чем через 10 минут после отключения накала, отключить вентилятор обдува генераторной лампы рубильником Q₁.

4.6. Отключить компрессор и прекратить подачу плазмообразующего газа в плазмотрон.

4.7. Не менее, чем через 10 минут после отключения накала, отключить систему мокрой очистки отходящих из реактора газов.

4.8. Отключить трёхфазный рубильник на питающем щите.

4.9. Принять меры по ликвидации аварии, немедленно сообщить руководителю работ.

4.10. В случае травмирования работников, немедленно после вызова скорой помощи по тел. 03, приступить к оказанию доврачебной помощи, сообщить руководителю работ.

4.11. Устранить воздействие на организм пострадавшего повреждающих факторов, угрожающих его здоровью и жизни (освободить от действия электрического тока, погасить горящую одежду); вывести пострадавшего на свежий воздух, обеспечить полный покой, усадить в удобное кресло или уложить, предохраняя от охлаждения.

4.12. При поражении электрическим током необходимо как можно скорее освободить пострадавшего от действия электрического тока, так как от продолжительности этого действия зависит тяжесть электротравмы, поэтому необходимо немедленно отключить ту часть установки, которой касается пострадавший.

Если невозможно произвести быстрое отключение установки, то необходимо отделить пострадавшего от токоведущих частей (палкой, доской, оттянуть за полы пиджака, руками, обмотанными шарфом и т. п.)

4.13. После освобождения пострадавшего от действия повреждающих факторов необходимо оценить его состояние:

- а) сознание: ясное, отсутствует;
- б) дыхание: нормальное, отсутствует;
- в) пульс на сонных артериях: хорошо определяется, плохо определяется.

4.14. Если пострадавший находится в сознании, но до этого был в обмороке с сохранившимся устойчивым дыханием и пульсом, следует выполнить следующие действия:

- а) уложить пострадавшего на подстилку, например из одежды;
- б) расстегнуть одежду, стесняющую дыхание;
- в) обеспечить приток свежего воздуха;
- г) освободить помещение от посторонних людей и создать полный покой, наблюдая за пульсом и дыханием.

4.15. Если пострадавший дышит очень редко и судорожно, но у него прощупывается пульс, необходимо сразу же начать делать искусственное дыхание. Для этого, прежде всего, необходимо обеспечить проходимость верхних дыхательных путей (пальцем, обвёрнутым бинтом или тканью удалить из полости рта инородное содержание). Затем оказывающий помощь располагается сбоку от головы пострадавшего, одну руку подсовывает под пострадавшего, а ладонью другой руки надавливает на его лоб, запрокидывая голову. Оказывающий помощь делает глубокий вдох открытым ртом, плотно охватывает губами открытый рот пострадавшего и делает энергичный выдох, с некоторым усилием вдувая воздух в его рот; одновременно он закрывает нос пострадавшего щекой. Как только грудная клетка поднялась, нагнетание воздуха приостанавливают.

4.16. Если у пострадавшего отсутствует сознание, дыхание, пульс, кожный покров синюшный, необходимо немедленно кроме искусственного дыхания делать наружный массаж сердца.

Оказывающий помощь располагается сбоку от пострадавшего, и, наклонившись, делает два быстрых вдувания, затем поднимается, оставаясь на этой же стороне от пострадавшего, ладонь одной руки кладёт на нижнюю половину грудины (отступив на два пальца выше от её нижнего края), а пальцы приподнимает. Ладонь второй руки он кладёт поверх первой, поперёк или вдоль и надавливает, помогая наклоном своего корпуса.

Надавливание следует производить быстрыми толчками, так чтобы смещать грудину на 4 - 5 см, продолжительность надавливания не более 0,5 с. За 1 минуту необходимо сделать не менее 60 надавливаний и 12 вдуваний.

4.17. *Первая помощь при ожогах:* на обожжённый участок кожи наложить стерильную повязку. Нельзя обожжённый участок кожи смазывать мазями, присыпать пищевой содой, вскрывать пузыри, удалять прилипшие вещества. Обожжённое лицо необходимо закрывать стерильной марлей.

При ожогах глаз ультрафиолетовым излучением разряда следует делать холодные примочки из раствора борной кислоты ($\frac{1}{2}$ чайной ложки на 1 стакан воды).

При обширных ожогах кожи пострадавшего необходимо завернуть в чистую простынь, не раздевая, напоить тёплым чаем и создать покой до прибытия врача.

5. ТРЕБОВАНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ПО ОКОНЧАНИИ РАБОТ.

5.1. Отключить дозировочный насос и прекратить подачу шлама в реактор.

5.2. Через 5 – 10 минут кнопкой S_5 отключить подачу высокого напряжения на установку.

5.3. Кнопкой S_4 отключить накал генераторной лампы.

5.4. Не менее, чем через 10 минут после выключения накала, перекрыть кран на водяном коллекторе, подающим охлаждающую воду.

5.5. Не менее, чем через 10 минут после выключения накала, выключить вентилятор обдува генераторной лампы рубильником Q_1 .

5.6. Отключить компрессор и прекратить подачу плазмообразующего газа в плазмотрон.

5.7. Не менее, чем через 10 минут после выключения накала, отключить работу системы мокрой очистки отходящих из реактора газов.

5.8. Поставить в исходное положение все переключатели.

5.9. Выключить трёхфазный рубильник на питающем щите.

5.10. Привести в порядок рабочее место.

5.11. О замеченных неисправностях сообщить руководителю работ и занести в рабочий журнал.

5. Требования к содержанию отчета

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

1. Цель проведения работы.
2. Краткое описание промышленных способов получения оксида азота.
3. Структурную схему лабораторной плазмохимической установки для исследования процесса фиксации атмосферного азота в условиях низкотемпературной плазмы ВЧ-факельного разряда.
4. Графические результаты расчетов равновесных составов продуктов плазмохимического процесса фиксации атмосферного азота.
5. Табличные и графические результаты расчетов удельных энергозатрат на ПЗХ процесс фиксации атмосферного азота.

6. Порядок выполнения работы.

Теоретическая часть.

1. При помощи программного комплекса «Астра-3» необходимо определить оптимальные параметры проведения процесса фиксации атмосферного азота при следующих исходных значениях:

Плазмообразующий газ – воздух.

Температура плазменной струи $T = 300 - 4000$ К

Давление $P = 0.05, 0.1, 0.2$ МПа

2. Определить теоретические удельные энергозатраты на исследуемый процесс.

$$\mathcal{E}_{\text{общ}} = H_T - H_{300}$$

$$\mathcal{E}_{\text{уд}} = \frac{\mathcal{E}_{\text{общ}}}{C_{NO}}$$

3. Полученные данные свести в таблицы: таблица 2 ($\mathcal{E}_{\text{общ}} = f(T)$), таблица 3 ($\mathcal{E}_{\text{уд}} = \varphi(T)$)

Практическая часть.

Определить при $I_a = (3,0; 3,5; 4,0; 4,5)$ А мощность потребляемую ВЧ генератором от сети (кВт).

$$P_0 = J_a \cdot U_a,$$

а также калориметрированием потерь мощности на водоохлаждаемых элементах генератора:

- $P_a = C_p \cdot m_a \cdot \Delta t_a \cdot 4.186$ – потери мощности на аноде, где C_p – теплоемкость воды (ккал/кг \cdot °C), m_a – массовый расход воды для охлаждения анода (кг/с), $\Delta t_a = t_{\text{ак}} - t_{\text{ан}}$ – разность температур охлаждаемой воды на аноде (°C).

- $P_c = C_p \cdot m_c \cdot \Delta t_c \cdot 4.186$ – потери мощности на сетке и анодном трансформаторе, где m_c – массовый расход воды для охлаждения сетки и анодного трансформатора (кг/с), $\Delta t_c = t_{\text{ск}} - t_{\text{сн}}$ – разность температур охлаждаемой воды на сетке и анодном трансформаторе (°C).

- $P_{\text{эл}} = C_p \cdot m_{\text{эл}} \cdot \Delta t_{\text{эл}} \cdot 4.186$ – потери мощности на электроде, где $m_{\text{эл}}$ – массовый расход воды для охлаждения электрода (кг/с), $\Delta t_{\text{эл}} = t_{\text{элк}} - t_{\text{элн}}$ – разность температур охлаждаемой воды на электроде (°C)

После этого определяется мощность, выделяемая в разряде (кВт)

$$P_p = P_0 - (P_a + P_c + P_{\text{эл}} + P_r),$$

а затем энтальпию плазменной струи, генерируемой ВЧФ-плазмотроном (кДж/кг)

$$H_T = H_{300} + P_{\text{стр}}/m_{\text{пг}}$$

где $m_{\text{пг}}$ – массовый расход плазмообразующего газа (кг/с).

Таблица 4

№	U _a	J _a	S	Q _{пг}	Анод		Сетка		Электрод		P _o	P _a	P _c	P _{эл}	P _p	H _T	T	C _N _o
					m _a	Δt _a	m _c	Δt _c	m _{эл}	Δt _{эл}								
	кВ	А		кг/с	кг/с	°C	кг/с	°C	кг/с	°C	кВт	кВт	кВт	кВт	кВт	кДж/кг	°К	мг/м ³

Среднемассовая температура плазменной струи определяется из графической зависимости на рисунке 8.

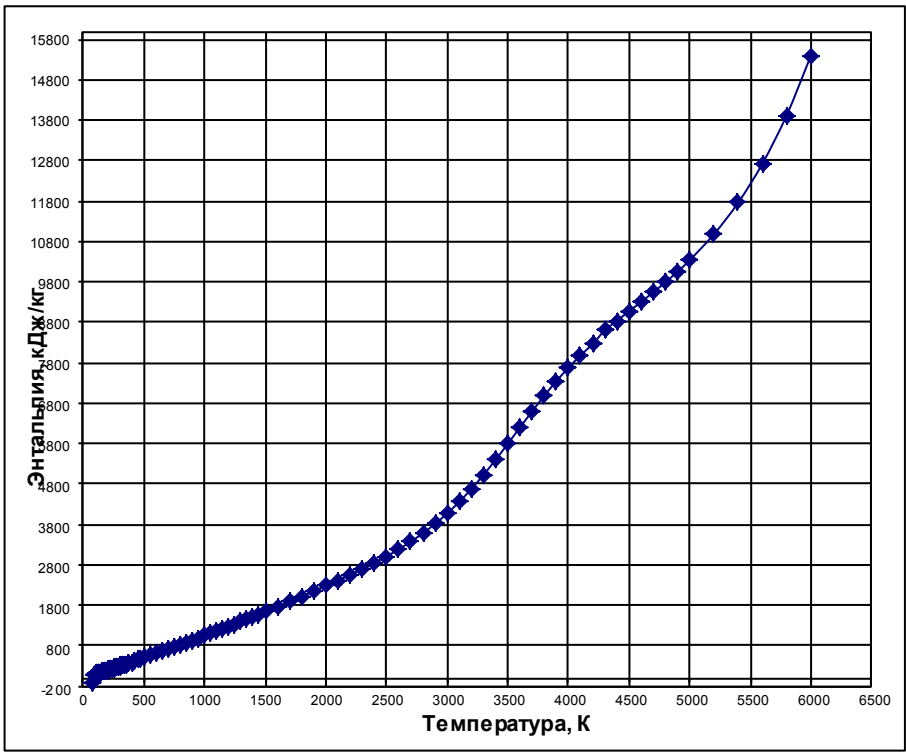


Рис. 8. Зависимость энтальпии воздуха от его температуры

- Построить экспериментальные зависимости концентрации NO и NO₂ от среднемассовой температуры плазменной струи, генерируемой ВЧФ-плазмотроном.
- Построить экспериментальные зависимости общих Э_{общ} и удельных Э_{уд} энергозатрат в процессе фиксации атмосферного азота при давлении P=0,1МПа.
- Сравнить результаты расчетов на программном комплексе «ТЕРРА» процесса фиксации атмосферного азота при давлении P=0,1МПа с экспериментальными данными. Сделать выводы.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Пархоменко В.Д., Цыбулев П.Н., Краснокутский Ю.И. Технология плазмохимических производств. – Киев: Выща школа, 1991. – 253с. (НТБ – 2 экз., кафедра ТФ – 1 экз.).
2. Туманов Ю.Н. Низкотемпературная плазма и ВЧ электромагнитные поля в процессах получения материалов для ядерной энергетики – М.: Атомиздат, 1989. – 276с. (НТБ – 2 экз., кафедра ТФ – 1 экз.).
3. Давыдов В.И., Гамрекели М.Н., Добрыгин Л.Г. Термические процессы и аппараты для получения окислов редких и радиоактивных металлов. – М.: Атомиздат, 1977. – 270с. (НТБ – 2 экз., кафедра ТФ – 1 экз.).
4. Крапивина С.А. Плазмохимические технологические процессы – Л.: Химия, 1981. – 248с. (НТБ – 2 экз., кафедра ТФ – 1 экз.).
5. Каренгин А.Г. Диссертация на спецтему. – Томск: ТПИ, 1980. – 184с. (кафедра ТФ – 1 экз. инв.№3592).
6. Артамонов А.Г., Володин В.М., Авдеев В.Г. Математическое моделирование и оптимизация плазмохимических процессов.– М.: Химия, 1989. – 224с. (НТБ – 2 экз., кафедра ТФ – 1 экз.).
7. Сабуров В.П., Черепанов А.И., Жуков М.Ф. Плазмохимический синтез ультрадисперсных порошков и их применение. – Новосибирск: Наука, 1995. т.12–339с. (НТБ – 2 экз., кафедра ТФ – 1 экз.).
8. Физикохимия ультрадисперсных систем. // Сборник научных трудов IV Всероссийской конференции. – М.: МИФИ, 1999. – 336с. (НТБ – 2 экз., кафедра ТФ – 1 экз.).
9. Туманов Ю.Н. Электротермические реакции в современной химической технологии – М.: Наука, 1981. – 230с. (НТБ – 2 экз., кафедра ТФ – 1 экз.).
10. Рыкалин Н.Н. Плазменные процессы в металлургии и технологии неорганических материалов – М.: Наука, 1973. – 243с. (НТБ – 2 экз., кафедра ТФ – 1 экз.).
11. Полак Л.С. Теоретическая и прикладная плазмохимия. – М.: Наука, 1975. – 303с. (НТБ – 2 экз., кафедра ТФ – 1 экз.).
12. Полак Л.С. Очерки физики и химии плазмы. – М.: Наука, 1973. – 432с. (НТБ – 2 экз., кафедра ТФ – 1 экз.).
13. Иванов А.А., Соболева Т.К. Неравновесная плазмохимия. – М.: Атомиздат, 1978. – 204с. (НТБ – 2 экз., кафедра ТФ – 1 экз.).