

Math-Net.Ru

Общероссийский математический портал

В. И. Субботин, П. Л. Кириллов, Ф. А. Козлов, Очистка натрия от кислорода. Контроль за содержанием кислорода в натрии, *ТВТ*, 1965, том 3, выпуск 1, 154–163

Использование Общероссийского математического портала Math-Net.Ru подразумевает, что вы прочитали и согласны с пользовательским соглашением
<http://www.mathnet.ru/rus/agreement>

Параметры загрузки:

IP: 44.220.255.141

5 ноября 2024 г., 02:11:00



УДК 541.123.012.5+543.844:546.33

**ОЧИСТКА НАТРИЯ ОТ КИСЛОРОДА.
КОНТРОЛЬ ЗА СОДЕРЖАНИЕМ КИСЛОРОДА В НАТРИИ**

В. И. Субботин, П. Л. Кириллов, Ф. А. Козлов

Проведены испытания холодных и горячих ловушек для очистки натрия от окислов. На основе экспериментальных данных получены характеристики, позволяющие определять их эффективность. Дана аналитическая зависимость растворимости кислорода в натрии в зависимости от температуры. Разработаны специальные приборы для определения концентрации кислорода в натрии. С этой целью разработан также пробоотборник — дистиллятор, обеспечивающий чувствительность $(3-6) \cdot 10^{-4}$ вес. % кислорода.

Обеспечение чистоты теплоносителя является одной из основных задач технологии реакторов, охлаждаемых натрием. Недостаточное внимание к этой проблеме может привести не только к ухудшению характеристик всей энергетической установки, но и сделать ее практически неработоспособной.

Основной примесью, которая обычно находится в натрии, является окись натрия. Присутствие кислорода в натрии вредно по следующим причинам: возрастает скорость коррозии конструкционных материалов, увеличивается перенос массы, ухудшается работа теплообменного оборудования и может произойти даже закупорка трактов. В разных системах эти явления происходят по-разному в зависимости от температуры применяемых материалов, конструкции контура и других факторов. Поэтому не может быть единого мнения о максимально допустимой концентрации кислорода в натрии. По-видимому, эта величина должна определяться допустимой скоростью коррозии материалов, используемых в контакте с натрием, а также минимальной температурой в контуре с тем, чтобы окислы не переходили из раствора в осадок.

Окись натрия может диссоциировать; следовательно, кислород в натрии присутствует в ионной форме. Практически важным является тот факт, что растворимость кислорода в натрии резко понижается с уменьшением температуры. Обобщение данных различных работ и результатов наших опытов показывает, что зависимость растворимости кислорода от температуры может быть выражена формулой:

$$\lg C = 1,2 - \frac{1900}{T}, \quad (1)$$

где C — содержание кислорода в % вес., T — температура, °К.

Для очистки натрия в контурах применяются холодные и горячие ловушки. На основе экспериментального материала ниже приводятся их характеристики, а также рассматриваются особенности тех задач, которые возникают при их конструктивной разработке.

Холодные ловушки

Низкая растворимость кислорода в натрии при температурах 100—150° позволяет использовать для очистки холодные ловушки — аппараты, в которых происходит охлаждение натрия и улавливание окислов. При разработке холодной ловушки требуется решить следующие задачи:

1) определить концентрацию кислорода в натрии, достижимую при помощи холодной ловушки, 2) предусмотреть достаточную емкость ловушки по окислам, необходимую для продолжительной, непрерывной работы, 3) обеспечить удовлетворительные теплотехнические характеристики — небольшие потери тепла и небольшие поверхности, чтобы не снижать к.п.д. установки и не увеличивать габариты ловушки.

Опыт эксплуатации холодных ловушек на работающих системах показывает, что основная проблема заключается в увеличении их емкости по окислам. Решение ее требует такого выбора параметров и режимов, при которых распределение окислов в ловушке было бы равномерным по объему. Проведенное изучение механизма осаждения окислов натрия из потока при разных скоростях и температурах испытания и многолетняя эксплуатация холодных ловушек позволили составить довольно полное представление о тех требованиях, которые необходимо учитывать при их конструировании.

Несмотря на большое разнообразие конструктивных решений, почти любая холодная ловушка может быть представлена схематически состоящей из трех частей — зоны охлаждения, отстойника и зоны фильтрации. Изучение основных закономерностей осаждения окислов в этих зонах производилось на специальных экспериментальных участках, моделирующих в определенной степени части холодной ловушки.

Схема участка и основные результаты опытов показаны на рис. 1. Участок охлаждался сплавом натрия с калием. Концентрация кислорода в натрии на входе в участок поддерживалась на заданном уровне. Некоторое время через участок прокачивался натрий, затем он отключался вентилями, быстро замораживался и вырезался из контура. В вакуумной камере дистилляционно-газовым методом измерялось распределение кислорода по длине.

В зоне охлаждения осаждение окислов начинается практически сразу же после охлаждения натрия до температуры насыщения. Увеличение скорости даже до 10 м/сек не позволяет избежать высаждения окислов. Максимальная местная концентрация окислов, отмеченная в этой зоне, составляет 80%. Присутствие в зоне охлаждения центров кристаллизации резко увеличивает удержание окислов в ней. В наших опытах центрами

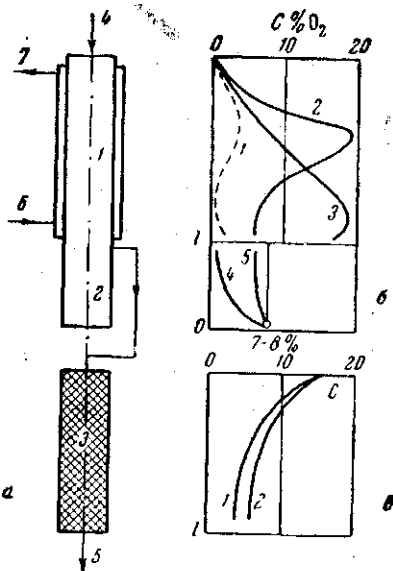


Рис. 1. а — Схема экспериментального участка для изучения высаждения окислов из потока натрия.

1 — зона охлаждения; 2 — отстойник; 3 — зона фильтрации; 4—5 — поток натрия; 6—7 — поток сплава натрий — калий

б — Качественная картина распределения концентраций окислов в зоне охлаждения и отстойнике по длине (С — концентрация кислорода в % вес).

1 — без набивки; 2 — с набивкой при скорости натрия 10 мм/сек; 3 — с набивкой при скорости натрия 500 мм/сек; 4 — при малом накоплении окислов; 5 — при большом накоплении окислов

в — Качественная картина распределения концентраций окислов в зоне фильтрации.

1 — при скорости 3 мм/сек; 2 — при скорости ~10 мм/сек

кристаллизации являлась набивка из стружки нержавеющей стали. В отстойнике окислы могут распределяться двояко. При малых накоплениях — концентрация их экспоненциально убывает при удалении от дна, при больших — распределение концентраций почти равномерно. В обоих случаях максимальная концентрация составляет около 25%. В зоне фильтра максимальная местная концентрация окислов достигает примерно 65%, а распределение окислов по длине зависит от скорости натрия и плотности набивки. В наших опытах было замечено, что осаждение окислов в зоне охлаждения при отсутствии набивки нестабильно. Наблюдается большой разброс экспериментальных данных. Одна из возможных причин нестабильности результатов заключается в инертном газе, скапливаемом в экспериментальном участке. Присутствие газа вызывает дополнительную турбулилизацию потока и влияет на теплообмен [1], а следовательно, и на массообмен.

Испытания ловушек позволили определить основные показатели, характеризующие их эффективность. К ним относятся фильтрационные характеристики, определяющие скорость и глубину очистки; емкость ловушки по окислам; распределение температур в ловушке; влияние окислов на теплообмен.

Конструкции двух холодных ловушек представлены на рис. 2 и 3. На этих же рисунках приведены некоторые экспериментальные данные, полученные на этих ловушках.

При испытании холодных ловушек загрязнение натрия производилось перекисью, которая вводилась в контур порциями по 60—80 г. Контроль за содержанием кислорода осуществлялся при помощи пробкового индикатора и пробоотборника-дистиллятора. При снятии фильтрационных характеристик концентрация кислорода в натрии изменялась в интервале $0,01 \div 0,0005$ % вес., а при работе ловушки в режиме накопления окислов $0,005—0,001$ % вес.

Экспериментальные фильтрационные характеристики сравнивались с расчетной, полученной при следующих предположениях: идеальное перемешивание натрия в системе; источники кислорода отсутствуют; количество окислов, улавливаемых холодной ловушкой за бесконечно малый отрезок времени, равно

$$G(C - C')\alpha dt.$$

Зависимость концентрации кислорода в натрии от времени работы ловушки выражается уравнением

$$C = C' + (C_0 - C')^{1 - G\alpha t/P}, \quad (2)$$

где C_0 — начальная концентрация кислорода; C' — концентрация насыщенного раствора при температуре в ловушке; G — расход натрия через ловушку; P — вес натрия в системе; t — время, α — коэффициент, учитывающий неполное удержание окислов в холодной ловушке.

Для первой ловушки сравнение опытных данных с расчетом приведено на рис. 2а. Из рисунка видно, что в пределах точности опыта экспериментальные данные совпадают с расчетом вплоть до расходов натрия ~ 120 л/час (время пребывания натрия в ловушке ~ 18 мин).

Из опытов, проведенных со второй ловушкой (см. рис. 4), видно, что при расходе натрия через ловушку 1000 л/час (время пребывания ~ 9 мин) имеет место пронос окислов. Причем с ростом количества окислов, накопленных в ловушке, пронос окислов снижается, но при данном расходе не достигается полного удержания ($\alpha \neq 1$).

Другие опыты показали, что коэффициент удержания при одном и том же количестве окислов, накопленных в ловушке, возрастает с уменьшением расхода натрия через ловушку и практически становится равным единице, когда время пребывания металла в ловушке составляет 15—20 мин.

Концентрация кислорода в натрии, достижимая при помощи холодной ловушки, определяется температурой в холодной ловушке и равна растворимости кислорода в натрии при этой температуре. Время, необходимое для достижения этой концентрации, может быть определено по уравнению

$$\tau = 5P / \alpha G. \quad (3)$$

Количество окислов, накапливаемых холодными ловушками, в значительной мере определяется режимами эксплуатации их.

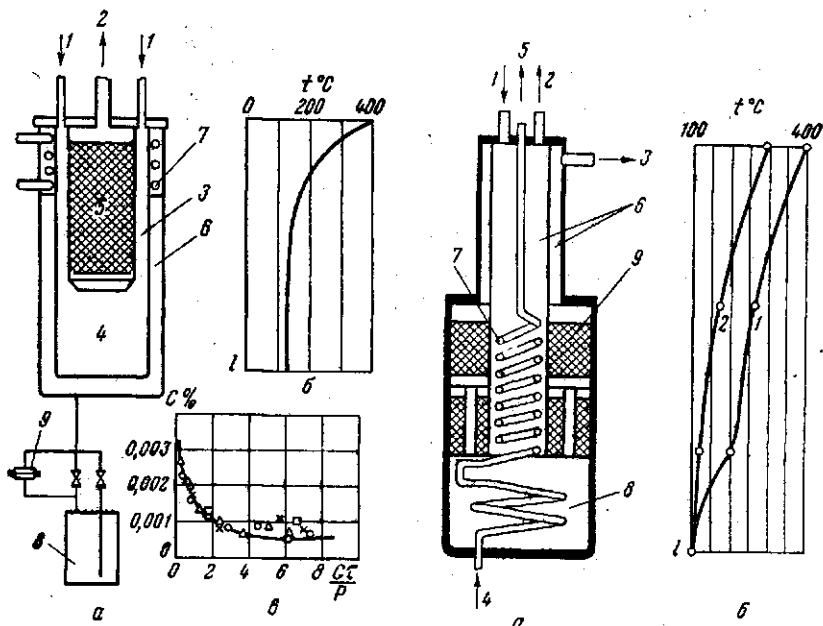


Рис. 2

Рис. 3

Рис. 2. а — Схема ловушки с толуоловым охлаждением.

1 — вход натрия; 2 — выход натрия; 3 — зона охлаждения; 4 — отстойник; 5 — зона фильтрации; 6 — полость толуола; 7 — конденсатор, охлаждаемый водой; 8 — сливной бак толуола; 9 — предохранительная мембрана
б — Распределение температуры по длине зоны охлаждения и отстойника.

а — Изменение концентрации во времени.

C — концентрация, % вес.; G — расход; τ — время; P — вес натрия в системе

Рис. 3. а — Схема ловушки с охлаждением сплавом натрия с калием.

1 — вход натрия; 2 — продувка в бак насоса; 3 — выход натрия; 4—5 — поток сплава натрий — калий; 6 — рекуператор; 7 — зона охлаждения; 8 — отстойник; 9 — зона фильтрации

б — Распределение температуры по длине ловушки.

1 — в центре ловушки; 2 — на периферии

В испытательный стенд с объемом металла около 200 л загружалась порциями до 90 кг перекись натрия. Это само по себе служит убедительным доказательством хорошей работоспособности холодных ловушек. Возрастание гидравлического сопротивления ловушки в режиме накопления окислов всегда происходило из-за закупорки в зоне охлаждения. Чем больший градиент температуры имелся здесь, тем более интенсивным было осаждение. Уменьшение числа Рейнольдса в зоне охлаждения несколько снижает интенсивность осаждения окислов в ней, закупорка зоны происходит позже, при большей концентрации окислов в объеме ловушки.

Наибольшее содержание окислов в холодных ловушках при первом возрастании их гидравлического сопротивления составляло 15—20%. Однако эти цифры могут быть повышены до 40%, если через ловушку некоторое время прокачивать чистый металл. Такой режим приводит к пере-

распределению окислов по объему ловушки и позволяет в последующей эксплуатации увеличить ее емкость по окислам. При конструировании холодных ловушек важно знать относительные объемы каждой зоны ловушки. В табл. 1 приводятся доля окислов, задерживаемых каждой зоной, средняя концентрация окислов в каждой зоне и ее объемная доля.

Анализ содержимого холодных ловушек производился дистилляционно-газовым методом. При помощи этого метода было изучено также распределение окислов по различным зонам ловушки.

Таблица 1
Распределение окислов по зонам
холодных ловушек

Зона	Доля удовлен- ных окис- лов	Средняя концент- рация окислов	Объемная доля зоны
Охлаждения	35	23—33	0,3—0,27
Отстойника	30	18	0,4—0,45
Набивки	35	26—33	0,3—0,28

Сущность метода заключается в предварительной отгонке части натрия из смеси с окислами и последующего растворения остатка (смеси окиси и натрия) этиловым спиртом и водой. В результате этой реакции образуются щелочь, алкоголяты натрия и газообразный водород. Ход реакции контролируется по давлению и температуре. Измерив объем выделившегося водорода и щелочность полученного раствора, можно вычислить количество окислов, содержащихся в смеси. Подобным методом может проводиться и регенерация холодных ловушек, т. е. восстановление работоспособности закупоренных ловушек. Преимущества такого метода заключаются в следующем:

1) основная масса натрия отгоняется и может быть использована в дальнейшем; 2) из контура удаляются продукты коррозии; 3) ловушка возвращается в исходное состояние. К недостаткам метода следует отнести неизбежность использования веществ, интенсивно реагирующих с натрием (этиловый спирт, вода).

Расчет теплообмена в холодных ловушках весьма сложен. Малые скорости вынужденного движения металла, большие размеры сечений приводят к тому, что теплообмен определяется совместным действием свободной и вынужденной конвекции. Известное правило Мак-Адамса для расчета теплообмена в смешанном режиме в применении к жидким металлам не выполняется. Кроме того, осаждение окислов на поверхности теплообмена изменяет характер течения и создает дополнительное термическое сопротивление на поверхности теплообмена. Это приводит к значительному изменению первоначального коэффициента теплопередачи (в 1,5—2 раза и более). В связи с этим нарушается и температурный режим ловушки. Это обстоятельство следует учитывать при конструировании теплообменников в холодных ловушках.

В зоне охлаждения целесообразно не допускать снижения температуры на выходе (например из рекуператора холодной ловушки) ниже температуры насыщения натрия окислами.

Отстойник не имеет каких-либо сложных конструктивных особенностей, которые стоило бы обсуждать. Важно лишь правильно организовать гидродинамику потока для того, чтобы не было больших возмущений и выноса окислов из этого объема.

В последней зоне ловушки фильтрация осуществляется через набивку, выполненную из стружки нержавеющей стали с плотностью, возрастающей по ходу металла. Распределение окислов по длине зоны фильтрации более равномерно при малых скоростях (3—5 мм/сек), чем при больших.

Выбор охладителя для холодной ловушки определяется условиями всей технологической схемы установки. Практика показала, что для мелких экспериментальных установок целесообразно использовать воду или толуол, а для крупных — сплав натрия с калием, по составу близкий к эвтектическому. Усложнение схемы при этом представляется оправданным.

Горячие ловушки

В тех случаях, когда в качестве конструкционных материалов используются ниобий, тантал, ванадий, необходимо снижение концентрации кислорода в натрии ниже уровня, обеспечиваемого холодными ловушками. Для этих целей применяются горячие ловушки (геттерная очистка). Геттеры восстанавливают окислы натрия до чистого натрия. Проведенные термодинамические оценки показывают, что цирконий, титан, торий, уран и др. способны обеспечить глубину очистки натрия от кислорода при температуре 600° С до ~10⁻⁶% и ниже. Однако выбор геттера определяется не только термодинамическими соображениями, но и совместимостью его с конструкционными материалами и с газами, находящимися над свобод-

Таблица 2

Привесы циркония, выдержанного в натрии

Время выдержи в натрии, часы	Привес на единицу поверхности в г/м ² · 10 ³	Скорость натрия, м/сек	Время выдержи в натрии, часы	Привес на единицу поверхности в г/м ² · 10 ³	Скорость натрия, в м/сек
<i>t = 540° С</i>			<i>t = 600° С</i>		
15		0,50	115	33,2	0,25
15	3,1	2,80	115	28,0	1,42
15	1,8	4,25	115	27,2	2,16
15	4,6	0,50	250	59,4	0,13
34	6,3	0,40	250	44,7	0,72
34	4,9	2,30	250	45,2	1,09
34	5,3	3,50			
34	3,1	0,40			
101	8,5	0,27			
101	7,3	1,57	101	109,5	0,07
101	7,1	2,32	101	88,4	0,40
250	10,3	0,20	101	87,9	0,62
250	10,5	1,15	123	101,5	0,46
250	10,0	1,74	123	123,5	0,05
435	21,1	1,00	250	161,7	0,07
435	19,7	1,50	250	131,2	0,38
435	21,6	0,17	250	130,4	0,58
				<i>t = 675° С</i>	

ным уровнем натрия. Наиболее практичным является использование циркония или его сплавов с титаном, так как при реакции с кислородом они образуют плотную пленку окиси, которая сцеплена с основным металлом.

В литературе накоплено значительное количество сведений о взаимодействии кислорода с цирконием, находящимся в натрии [2, 3]. Поскольку этих данных недостаточно для конструирования горячих ловушек, были проведены исследования, в которых изучался привес циркония в зависимости от температуры (400—1100° С), времени выдержки в натрии (15—435 час), концентрации кислорода в натрии (натрий очищен холодной и горячей ловушками) и скорости натрия (0,05 ÷ 5,7 м/сек). Некоторые результаты опытов приведены в табл. 2. Было найдено, что изменение веса йодидного циркония дуговой плавки при выдержке его в натрии, в зависимости от времени и температуры для концентрации кислорода, обеспечиваемой холодной ловушкой при температуре внутри ее ~110° (C ≈ 0,0005% вес) может быть описано уравнением

$$\Delta P / S = 1,8 \cdot 10^5 \tau^{0,51} e^{-15700/T}, \quad (4)$$

где $\Delta P / S$ — привес, г/дм², T — температура, °К, τ — время, час.

Данное уравнение может быть использовано для определения привеса циркония в интервале температур 510—675° С, лишь когда привес для циркониевой фольги толщиной 0,1 мм не превышает 4%.

В исследованном нами интервале температур (510—675° С) не было обнаружено зависимости привеса циркония от скорости натрия, когда концентрация кислорода поддерживалась на уровне 0,0005 % вес. В натрии, очищенном горячей ловушкой, привесы циркония уменьшаются в 2,5 раза по сравнению с привесами циркония, выдержанного в натрии, очищенном холодной ловушкой, при прочих равных условиях. Результаты этого опыта приведены на рис. 5. Обращает внимание тот факт, что в натрии, очищенном горячей ловушкой, при уменьшении скорости с 0,2 до 0,02 м/сек привес циркония уменьшается более чем в 2,3 раза. По-видимому, это объясняется тем, что при малых концентрациях кислорода за-

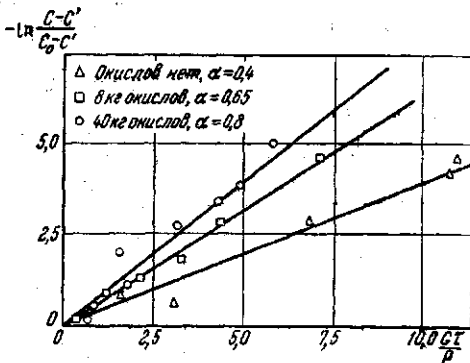


Рис. 4. Фильтрационные характеристики ловушки при расходе натрия 1500 л/час и разном количестве окислов в ловушке

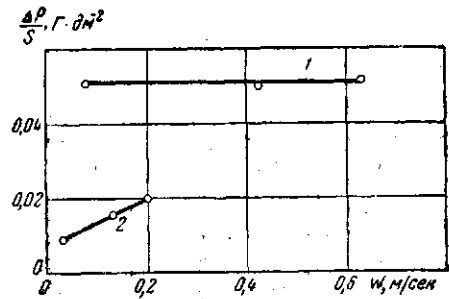


Рис. 5. Зависимость привеса циркония (при выдержке его в натрии при 620° С в течение 115 час) от скорости натрия. 1 — натрий, очищенный холодной ловушкой; 2 — натрий, очищенный горячей ловушкой

метную роль в кинетике процесса играет диффузия кислорода в натрии.

Этот опыт подтверждает (косвенно), что горячая ловушка обеспечивает большую глубину очистки, чем холодная ловушка. При этом содержание кислорода настолько мало, что оно не может быть определено существующими методами анализа.

Химический анализ образцов, выдержанных в натрии, показал, что привес циркония определяется главным образом поглощением кислорода. Концентрации углерода, азота, водорода оставались на прежнем уровне.

Рентгенографические и металлографические анализы показали, что после 250-часовой выдержки циркония при температуре 600—675° С в натрии, очищенном холодной ловушкой, толщина пленки окислов достигает 0,1 мм. На образцах, испытанных при температуре 540 и 560° С, окислы циркония рентгенографически не обнаружены.

Допустимый привес циркония на единицу поверхности, с точки зрения охрупчивания и отслаивания окисной пленки, зависит от содержания кислорода. При концентрации кислорода в натрии ~0,0005 % вес. эта величина составляет около 4%. Для натрия, очищенного горячей ловушкой, величина допустимого привеса снижается до 1,5—2%. Причем в первом случае привес ограничивается и охрупчиванием, и отслаиванием окисных пленок, во втором случае — только охрупчиванием образцов. Более интенсивное охрупчивание циркония при выдержке его в натрии, содержащем меньшее количество кислорода, вероятнее всего можно объяснить более равномерным распределением кислорода по сечению образца. При больших содержаниях кислорода на поверхности циркония образуются толстые окисные пленки, затрудняющие диффузию кислорода в глубь образца. Это предположение подтверждается измерениями удельного электрического сопротивления циркония, выдержанного в натрии.

Прибор контроля за содержанием кислорода в натрии

В наших опытах определение концентрации кислорода в натрии производилось как физико-химическими методами (дистилляционный и дистилляционно-газовый), так и при помощи специальных приборов (пробковый индикатор и ρ -метр).

Тарировка пробкового индикатора окислов, ρ -метра и все контрольные измерения осуществлялись при помощи разработанного дистилляционного метода (пробоотборник-дистиллятор, рис. 6). В разработке конструкции

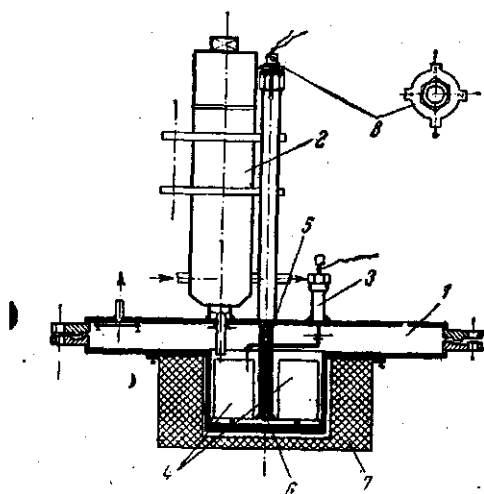


Рис. 6

Рис. 6. Конструкция пробоотборника-дистиллятора.

1 — вакуумная камера; 2 — сливной вентиль; 3 — уровнемер; 4 — стаканы; 5 — поворотная штанга; 6 — термомпара; 7 — печь; 8 — указатель номера стакана

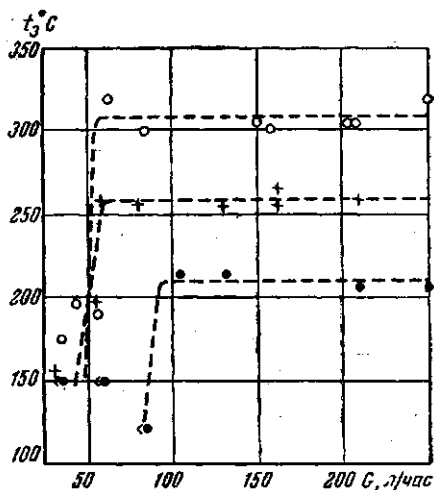


Рис. 7

Рис. 7. Показания пробкового индикатора в зависимости от расхода и уровня загрязненности натрия

пробоотборника-дистиллятора и методики анализа принимала участие И. Б. Дмитриева.

Проба натрия отбиралась из контура в один из четырех никелевых стаканов, помещенных в вакуумной камере. Конструкция позволяла отбирать четыре пробы через определенные промежутки времени. Уровень сливаемого металла контролировался передвижным контактным уровнемером.

Специальные опыты показали, что выдержка отобранной пробы в вакуумной камере в течение 9 час при остаточном давлении инертного газа $\sim 10^{-2}$ мм. рт. ст не приводит к заметному дополнительному загрязнению натрия кислородом. Затем натрий из стаканов отгоняется при температуре $530-540^\circ\text{C}$ и остаточном давлении $\sim 10^{-2}$ мм рт. ст. Оставшиеся окислы растворяются в воде, щелочность раствора, а следовательно, и количество окислов в пробе определяется титрованием. Чувствительность данного метода составляет $3-6 \cdot 10^{-4}\%$ вес. кислорода, и, по-видимому, есть возможности увеличить ее. Полное время, затрачиваемое на проведение одного анализа, составляет 3 часа. Табл. 3 иллюстрирует сходимость опытов по методу «введено — найдено».

Пробковый индикатор, состоящий из теплообменника, магнитного расходомера и клапана с отверстиями, оказался не таким простым прибором, как предполагалось ранее, и потребовались дополнительные исследования. Прежде всего обнаружилась зависимость показаний прибора от расхода металла через него и от размеров отверстий. Испытания индикаторов

с тремя различными конструкциями теплообменников и различными размерами отверстий показали, что эта зависимость неоднозначна для различных конструкций теплообменника и разных концентраций кислорода в натрии. Общим для всех конструкций является тот факт, что с уменьшением расхода натрия ниже определенного уровня показания прибора занижаются, становятся неустойчивыми. Чем ниже концентрация кислорода в натрии, тем при большем расходе прибор начинает давать неустойчивые показания.

Таблица 3

Результаты опытов «введено-найдено» с пробкоотборником-дистиллятором

в исходном натрии, г	Количество кислорода		Найдено кислорода	
	введено, г	суммарное, г	г	%
$5 \cdot 10^{-4}$	$3,90 \cdot 10^{-2}$	$3,95 \cdot 10^{-2}$	$3,37 \cdot 10^{-2}$	85
$6 \cdot 10^{-4}$	$3,90 \cdot 10^{-2}$	$3,96 \cdot 10^{-2}$	$3,47 \cdot 10^{-2}$	87
$4 \cdot 10^{-4}$	$3,90 \cdot 10^{-2}$	$3,94 \cdot 10^{-2}$	$3,20 \cdot 10^{-2}$	81
$6 \cdot 10^{-4}$	$7,80 \cdot 10^{-3}$	$8,4 \cdot 10^{-3}$	$7,04 \cdot 10^{-3}$	83
$6 \cdot 10^{-4}$	$7,80 \cdot 10^{-3}$	$8,4 \cdot 10^{-3}$	$7,00 \cdot 10^{-3}$	83
$7 \cdot 10^{-4}$	$1,56 \cdot 10^{-2}$	$2,26 \cdot 10^{-2}$	$2,00 \cdot 10^{-2}$	89
$3 \cdot 10^{-4}$	$1,56 \cdot 10^{-2}$	$1,86 \cdot 10^{-2}$	$1,40 \cdot 10^{-2}$	79
$4 \cdot 10^{-4}$	$1,58 \cdot 10^{-2}$	$1,98 \cdot 10^{-2}$	$1,58 \cdot 10^{-2}$	80
$8 \cdot 10^{-4}$	$8,4 \cdot 10^{-4}$	$1,64 \cdot 10^{-3}$	$1,60 \cdot 10^{-3}$	97
$4 \cdot 10^{-4}$	$7,8 \cdot 10^{-4}$	$1,18 \cdot 10^{-3}$	$1,10 \cdot 10^{-3}$	93
$7 \cdot 10^{-4}$	$7,8 \cdot 10^{-4}$	$1,48 \cdot 10^{-3}$	$1,40 \cdot 10^{-3}$	94

Увеличение размеров отверстий в клапане с $0,3 \times 0,3$ мм до $0,8 \times 0,8$ мм при неизменной конструкции теплообменника также приводит к увеличению расходов, при которых показания прибора становятся заниженными.

Типичная картина, получаемая в опытах по определению зависимости показаний прибора от расхода металла через него и от концентрации кислорода, для одного из приборов приведена на рис. 7.

Изучение зависимости показаний прибора от раз-

меров отверстий в клапане производилось методом сравнения показаний двух индикаторов, одновременно работающих на одной и той же установке. При этом расходы натрия через приборы обеспечивали их устойчивую работу. Оказалось, что приборы с отверстиями $0,5 \times 0,5$, $1,0 \times 0,75$ и 1×1 мм занижают показания по сравнению с прибором, имеющим отверстие $0,3 \times 0,2$ мм на 6,0; 6,3 и 8,5% соответственно.

При помощи пробкоотборника-дистиллятора была произведена тарировка пробкового индикатора окислов, имеющего размер отверстий $0,3 \times 0,2$ мм. Она показала, что для такого прибора для определения концентрации кислорода можно использовать кривую растворимости без введения каких-либо поправок. Точность определения температуры закипания составляет $\pm 10^\circ \text{C}$. Область стабильной работы пробковых индикаторов должна определяться экспериментально для каждой новой конструкции.

А. Ф. Сотников разработал прибор, предложенный Блэйком [4], основанный на изменении электросопротивления натрия в зависимости от концентрации примесей. Датчиком прибора служит трансформатор тока. Ток в первичной обмотке возбуждает ток в трубе с натрием, являющейся вторичной обмоткой трансформатора. Падение напряжения на вторичной обмотке зависит от тока, протекающего в ней и ее сопротивления. Это падение напряжения измеряется при помощи третьей (измерительной) обмотки. Температурная зависимость компенсируется особым сопротивлением, у которого температурный коэффициент сопротивления подобен температурному коэффициенту трубы с натрием. При полной температурной компенсации изменение сопротивления вторичной обмотки из-за изменения концентрации примесей в натрии приводит к изменению напряжения на измерительной обмотке. Этот сигнал через выходной трансформатор подается на фазочувствительный детектор и далее на показывающий прибор. Магнитопровод трансформатора выполнен из стали ХВЦ, точка Кюри для которой 900°C , а удельное электрическое сопротивление $0,5 \text{ ом мм}^2/\text{м}$. Обмотки трансформатора намотаны жаростойким медным никелированным проводом. Трансформатор испытан при 500°C .

При установке прибора на испытательный стенд перед прибором был вмонтирован сепаратор газа, чтобы избавиться от сигналов, вызываемых наличием газа в перекачиваемом натрии. При отклонениях температуры на $\pm 20^\circ$ изменения показаний прибора не превышают 3 мв. Надежный отсчет показывающего прибора при величине сигнала 3 мв соответствует

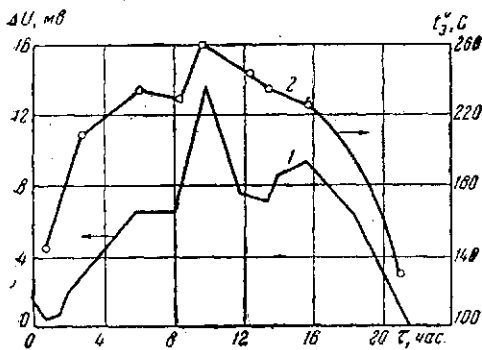


Рис. 8. Сравнение показаний ρ -метра и пробкового индикатора
1 — показания ρ -метра в мв; 2 — показания пробкового индикатора (температура забивания, $^\circ\text{C}$)

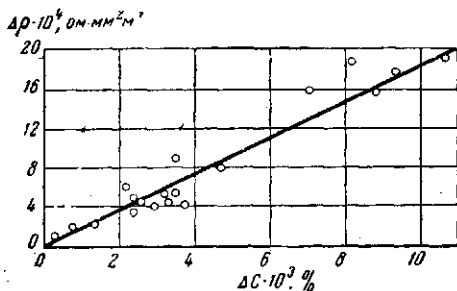


Рис. 9. Изменение удельного сопротивления натрия в зависимости от содержания кислорода

концентрации кислорода $1 \cdot 10^{-3}$ вес. $\%$. Сопоставление показаний ρ -метра и пробкового индикатора окислов при изменении концентрации кислорода в натрии показано на рис. 8.

Проведенные опыты позволили установить, что при температуре 350°C изменение удельного электрического сопротивления натрия с изменением концентрации кислорода подчиняется закону

$$\rho_{350} = \rho_{0,350} + \Delta\rho = 0,189 (1 + \Delta C),$$

где ρ_{350} — полное удельное электрическое сопротивление натрия при температуре 350°C $\text{ом} \cdot \text{мм}^2 / \text{м}$; $\rho_{0,350}$ — удельное электрическое сопротивление натрия при температуре 350°C и нулевой концентрации кислорода, $\text{ом} \cdot \text{мм}^2 / \text{м}$; $\Delta\rho$ — приращение удельного электрического сопротивления натрия за счет возрастания концентрации кислорода в натрии, $\text{ом} \cdot \text{мм}^2 / \text{м}$; ΔC — изменение концентрации кислорода в $\%$ вес.

Экспериментальные данные по определению зависимости приращения удельного электрического сопротивления натрия от концентрации кислорода представлены на рис. 9.

Разработки других методов (например шайбовый индикатор, или cogrosien meter, гальванический индикатор и др.) не привели пока к желаемому результату в смысле точности измерений и практичности в эксплуатации.

В проведении экспериментов, описанных во второй и третьей частях статьи, принимал участие Э. К. Кузнецов.

Москва

Поступила в редакцию
17 VI 1964

ЛИТЕРАТУРА

1. В. И. Субботин, Ф. А. Козлов, Н. Н. Ивановский, Теплофизика высоких температур, 2, 1, 1964.
2. M. Davis, A. Draughcott, Доклад № 25 на Междунар. конф. по использованию атомной энергии, Женева, 1958.
3. R. L. Carter, R. L. Eichelberger, Siegels, Доклад № 705 на Междунар. конф. по использованию атомной энергии, Женева, 1958.
4. L. R. Blake, A. R. Eames, Nucleonics, 19, 5, 66, 1961.