

Никель-водородный теплогенератор, непрерывно проработавший 7 месяцев

А.Г. Пархомов¹, В.А. Жигалов¹, С.Н. Забавин¹, А.Г. Соболев², Т.Р. Тимербулатов¹

Аннотация—Создан никель-водородный теплогенератор, непрерывно проработавший 225 суток при мощности тепловыделения сверх затраченной электроэнергии от 200 до 1000 Вт (тепловой коэффициент 1,6 – 3,6). Завершение работы связано с исчерпанием энергетического ресурса топлива. Общая наработка избыточной энергии около 4100 МДж. В качестве топлива в теплогенераторе использован насыщенный водородом порошок никеля массой 1,2 г. Выделение энергии на 1 атом никеля 2,1 МэВ. Анализируются изменения элементного и изотопного состава топлива и конструкционных материалов.

I. КОНСТРУКЦИЯ ТЕПЛОГЕНЕРАТОРА

Устройство теплогенератора (рис. 1) в общих чертах похоже на устройство ряда реакторов, созданных авторами этой статьи [1], [2], [3]. Основными отличиями являются применение более жаростойкой керамики и более надежная герметизация. Топливо (1,2 г порошка никеля ПНК-ОТ2) находилось в керамической трубке. Нагревателем служила спираль из вольфрамового провода, навитая на керамическую трубку, насаженную на трубку с топливом. Между трубкой с топливом и трубкой с нагревателем находился спай вольфрам-рениевой термопары. Хромель-алюмелевая термопара контролировала температуру наружной поверхности внешней керамической трубки. Теплостойкие центрирующие шайбы удерживали внутренние трубки в середине внешней. Торцы внешней трубки изолированы от атмосферы силиконовым герметиком. Благодаря достаточно большой длине внешней трубки и низкой теплопроводности керамики, во время работы теплогенератора температура ее концов не превышала температуру, допустимую для силикона. Из торцов реактора, помимо проводов нагревателя и термопары, выходит металлическая трубка для подключения манометра.

Электропитание реактора осуществлялось от вторичной обмотки трансформатора мощностью 630 Вт (рис. 2). Переключатель отводов вторичной обмотки позволял задавать нужную мощность нагрева. Термопара, измерявшая температуру трубки с топливом, подключена к терморегулятору ТРМ-500, отключающему питание при превышении предельной температуры.

¹ОКЛ КИТ, Москва, alexparh@mail.ru.

²ФИАН РАН, Москва.

Другой такой же прибор измерял температуру поверхности внешней трубки. Мощность электронагрева измерялась вольтметром и амперметром на выводах нагревателя, а также ваттметром, установленным на входе трансформатора. Сопоставление мощности на нагревателе с мощностью на первичной обмотке позволяет определить потери в трансформаторе и проводах. Это необходимо для внесения поправки в результаты измерений расхода электроэнергии по импульсам с электросчетчика “Меркурий – 201”, регистрируемым компьютером. Помимо температур и расхода электроэнергии, компьютер регистрировал импульсы со счетчика Гейгера, расположенного около теплогенератора.

II. ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ ОПЕРАЦИИ

На подготовительном этапе с целью удаления остатков воды и других летучих загрязнений из реактора форвакуумным насосом был откачан воздух при температуре до 300°C. После этого теплогенератор был заполнен водородом при давлении близком к атмосферному и выдерживался при температуре около 350°C 3 часа для очистки поверхности гранул никеля. После этого была сделана вторичная откачка газа для удаления воды, появившейся в результате восстановления оксида никеля водородом. Затем реактор был вторично наполнен водородом и выдерживался на протяжении 3 суток при температуре 350°C. Далее, после двукратного повторения цикла откачки – наполнения водородом теплогенератор был перемещен со стенда предварительной подготовки на основное рабочее место. Вид на работающий теплогенератор, измерительную и электросиловую аппаратуру показан на рис. 3.

III. ИЗМЕНЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ТЕПЛОГЕНЕРАТОРА В ПРОЦЕССЕ РАБОТЫ

На протяжении первого дня мощность нагрева электрическим током постепенно увеличивалась, что сопровождалось плавным ростом температуры внутри теплогенератора до температуры около 1100°C при потребляемой мощности 400 Вт (рис. 4). Дальнейшее увеличение мощности до 700 Вт привело к нагреву до 1500°C и появлению тепловыделения сверх потребляемой электрической мощностью около 130 Вт. После снижения мощности электронагрева до прежнего

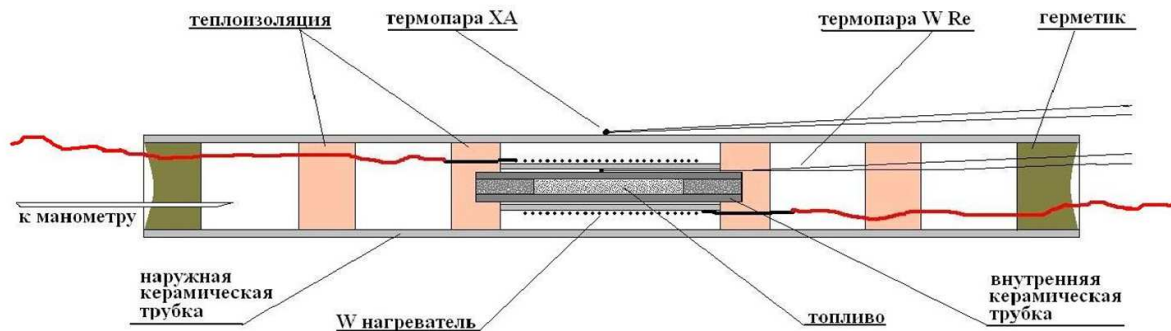


Рис. 1. Устройство теплогенератора.

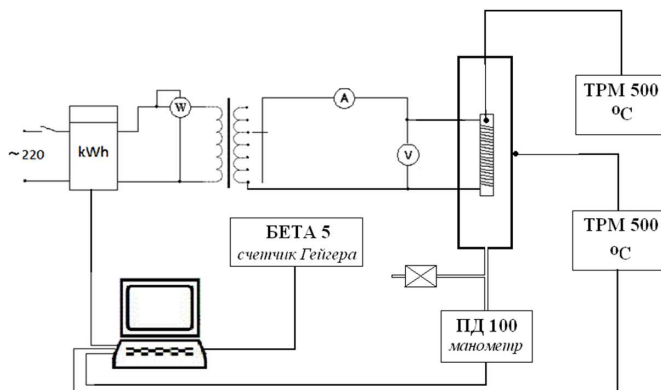


Рис. 2. Схема электропитания и измерительной аппаратуры.

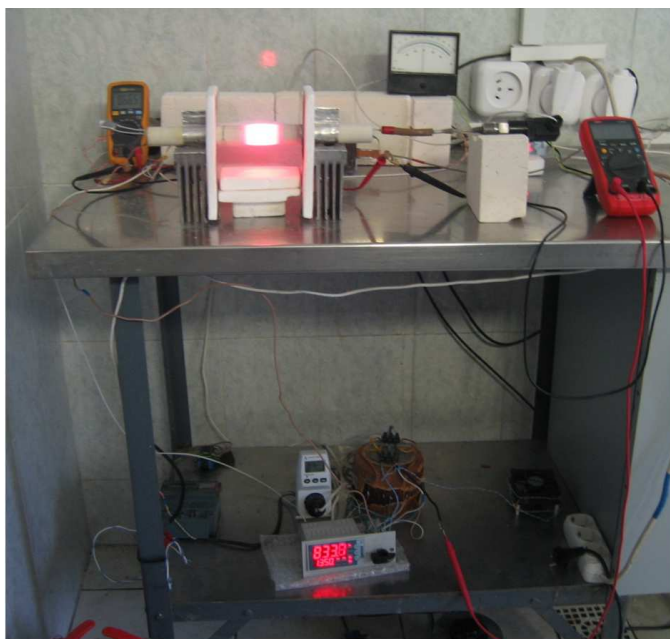


Рис. 3. Вид на работающий теплогенератор.

уровня мощность избыточного тепловыделения снизилась до 80 Вт, причем отношение мощности тепловыделения к потребляемой электрической мощности (COP) сохранилось на уровне 1,2. Методика определения избыточной мощности и COP будет изложена

ниже.

В дальнейшем при неизменной потребляемой мощности на протяжении 18 часов температура внутри реактора увеличилась с 1200 до 1500°C, а COP изменился с 1,2 до 2,3 (рис.5). Увеличение мощности электронагрева до 700 Вт привело к непродолжительному подъему температуры до 1800°C и возрастанию COP до 2,7. Но после этого при такой же мощности электронагрева температура и COP резко упали. Примерно через два часа температура вернулась к прежнему значению (1800°C), причем столь высокая температура сохранилась и после снижения мощности электронагрева до 400 Вт. При этом, мощность избыточного тепловыделения превысила 1000 Вт, а величина COP достигла 3,6. Столь высокие значения сохранялись около 6 часов. Затем началось снижение, и через день при неизменной мощности электронагрева температура снизилась до 1300°C, а избыточное тепловыделение до 200 Вт.

Дальнейшая работа теплогенератора с 14.10.2017 до 23.05.2018 (рис.6) проходила при мощности электронагрева, менявшейся в пределах от 350 до 380 Вт из-за нестабильности напряжения электросети. Исключением было несколько кратковременных повышений мощности нагрева. Эти контрольные повышения, кроме последнего, сделанного 17 мая, приводили к увеличению температуры и COP. Увеличение мощности 17 мая также привело к росту температуры, но величина COP осталась близкой к 1, что свидетельствовало об исчерпании ресурса теплогенератора.

Несмотря на то, что мощность электронагрева менялась в небольших пределах, другие параметры, характеризующие работу теплогенератора, менялись значительно. Постепенное самопроизвольное снижения температуры внутри теплогенератора и избыточного тепловыделения, продолжавшееся до 13 октября, сменилось ростом, длившимся до 18 октября. Температура достигла 1550°C, мощность избыточного тепловыделения возросла до 550 Вт (COP=2,5). После этого опять произошло снижение, сменившееся постепенным ростом, продолжавшимся до середины декабря (см.рис.6). С середины декабря до середины марта температура внутри реактора менялась в пределах 1300-1400°C, мощность избыточного тепловыделения постепенно па-

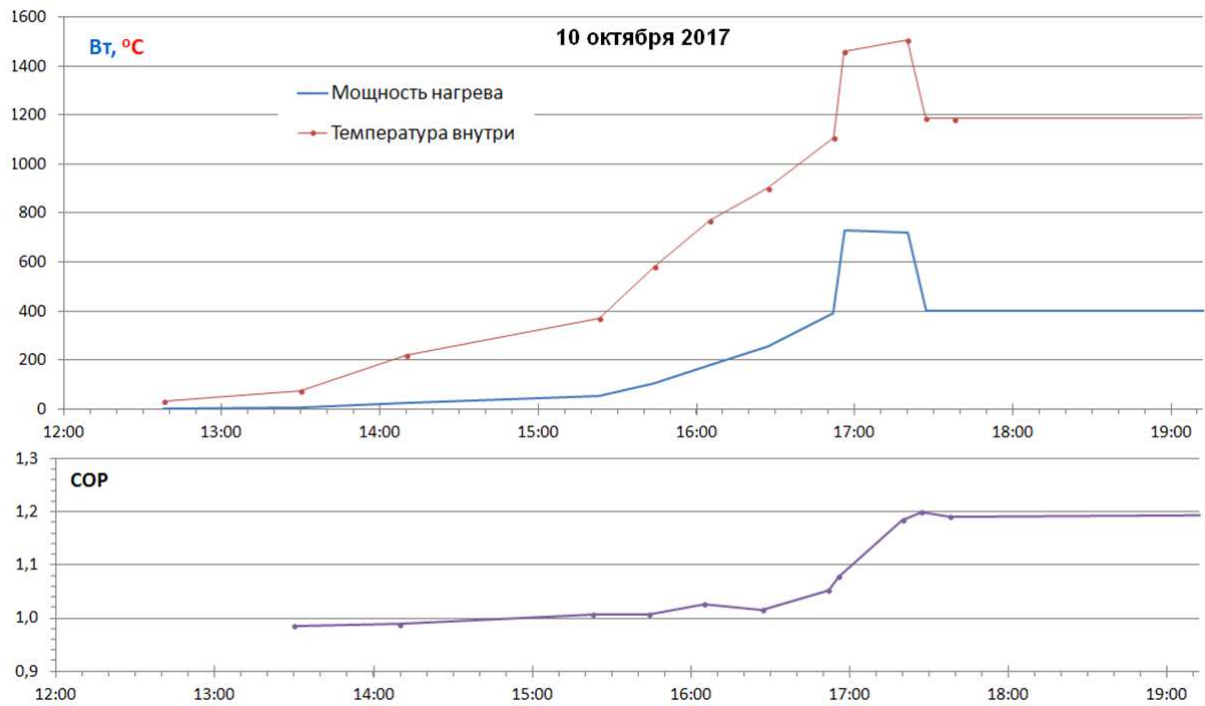


Рис. 4. Начало работы теплогенератора.

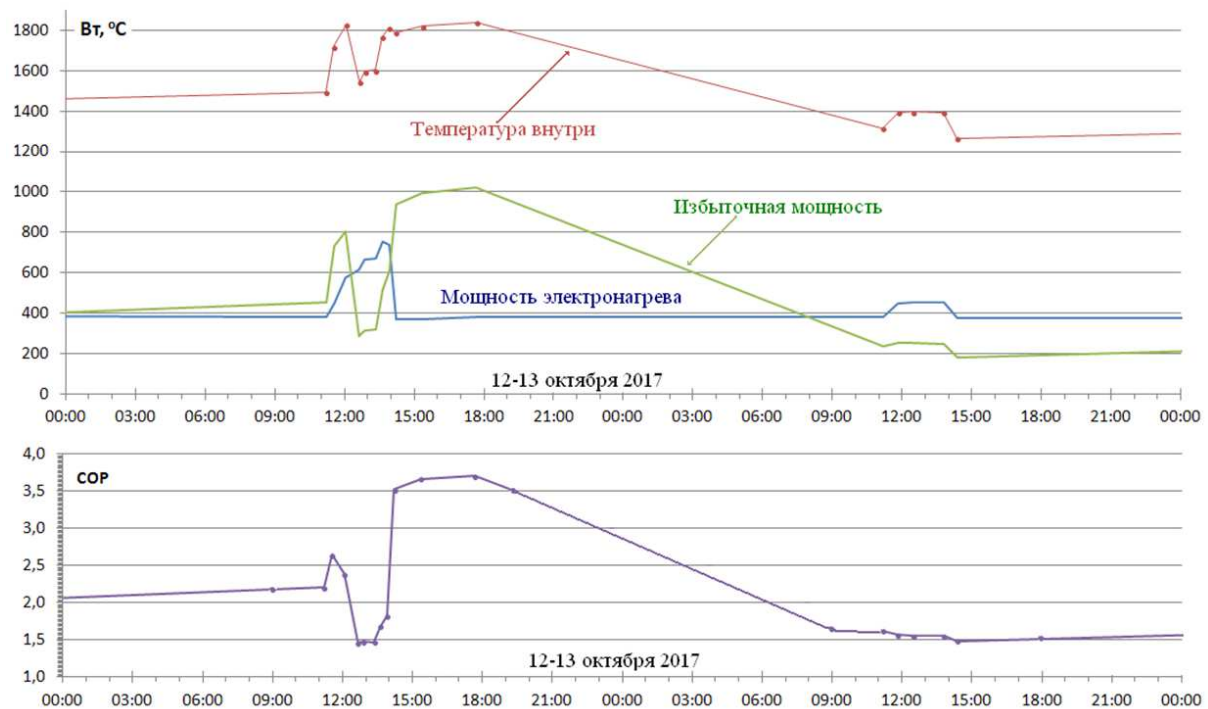


Рис. 5. 3-4 сутки работы теплогенератора.

дала с 300 до 200 Вт, а величина COP снизилась с 1,9 до 1,5.

В начале работы теплогенератора давление водорода было близким к атмосферному. В первые дни в процессе нагрева избыточное давление иногда повышалось вплоть до 1 бар. В таких случаях путем кратковременного открытия специального клапана давление

снижалось до атмосферного. Начиная с третьих суток давление падало, стало ниже атмосферного и через два месяца стабилизировалось на уровне -0,8 бар. 16 марта в теплогенератор был добавлен водород до давления близкому к атмосферному. Это привело к небольшому росту температуры и избыточного тепловыделения (величина COP возросла с 1,5 до 1,7), но затем избыточ-

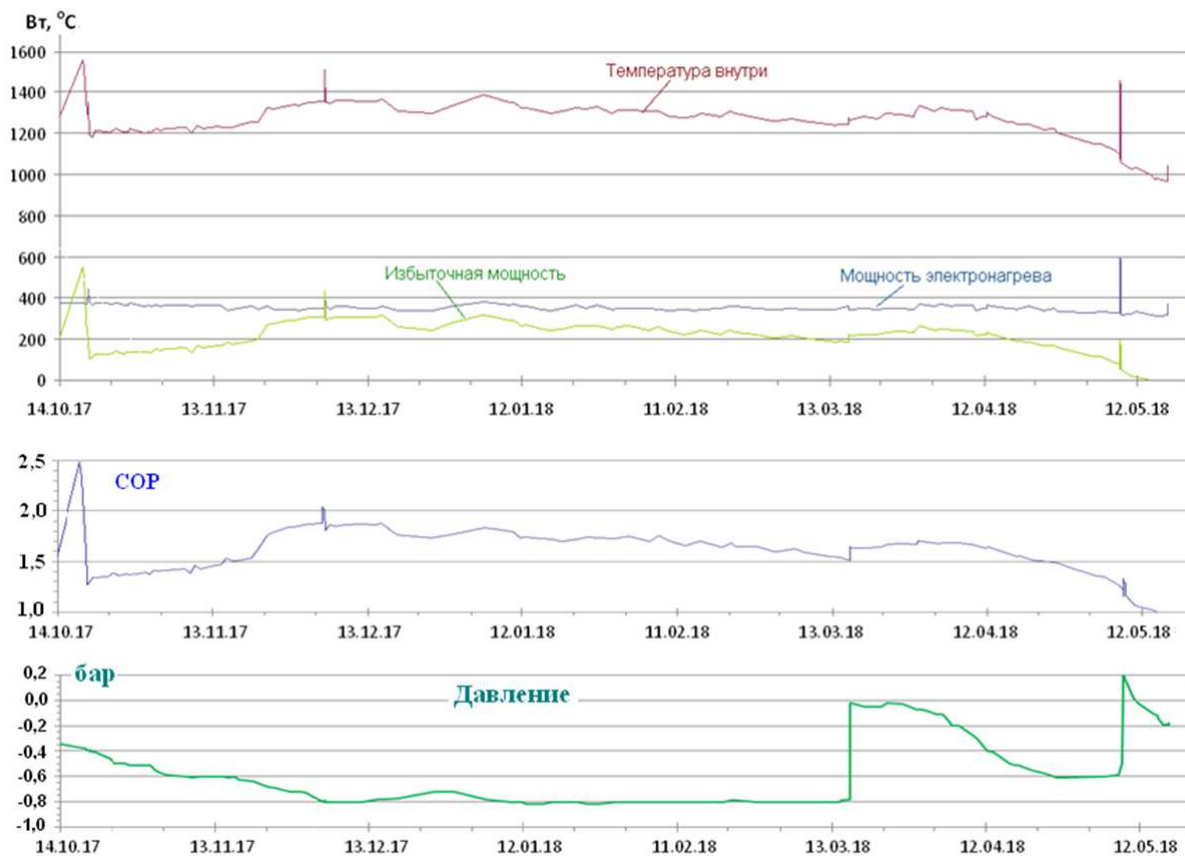


Рис. 6. Работа теплогенератора на протяжении 7 месяцев.

ная мощность стала падать ускоряющимися темпами. Попытка “оживить” теплогенератор 8 мая вторичным добавлением водорода и увеличением мощности электронного нагрева существенных результатов не дала. 14 мая выделение избыточного тепла прекратилось.

IV. ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОЩНОСТИ ТЕПЛО ВЫДЕЛЕНИЯ

Измерение потребляемой мощности, если используются резистивные нагреватели, подключенные к источникам постоянного или низкочастотного переменного тока, нетрудно осуществить с погрешностью порядка десятых долей процента, используя современную аппаратуру. Сложнее измерить мощность выделяющегося тепла. В различных установках для этого использованы калориметры, определяющие мощность тепловыделения по скорости нагрева воды или воздуха или по количеству испаряющейся воды [3], [4], [5], [6]. Однако при проведении длительных экспериментов применение этих методов является проблематичным.

В описываемом исследовании определение мощности тепловыделения осуществляли без специального калориметра. Эта методика основана на допущении о том, что температура в некоторой точке устройства, в котором выделяется тепло, при неизменных условиях теплосъема с этого устройства, однозначно связана с мощностью тепловыделения в этом устройстве. Зависимость мощности тепловыделения от температуры

(для каждой точки устройства особенная) определяется распределением источников тепла, теплопроводностями конструктивных элементов и условиями теплосъема с поверхности. Ее точный расчет ввиду крайней сложности не представляется возможным. Но в первом приближении можно считать, что коэффициенты теплопроводности постоянны, мощность теплоотдачи с поверхности устройства путем теплопроводности и конвекции линейно зависит от разности температуры в точке измерения и температуры окружающей среды $\Delta t = t - t_0$, а мощность теплоотдачи путем лучеиспускания, в соответствии с законом Стефана-Больцмана, возрастает пропорционально четвертой степени абсолютной температуры $T = 273 + t$, если t измеряется в градусах Цельсия. Отсюда следует, что зависимость мощности тепловыделения от температуры можно аппроксимировать полиномом четвертой степени $f(t) = a + b(\Delta t) + c(\Delta t)^2 + d(\Delta t)^3 + e(273 + t)^4$. Коэффициенты подбираются эмпирически так, чтобы аппроксимирующая функция наилучшим образом согласовывалась с результатами калибровочных измерений. Дополнительные члены второй и третьей степени позволяют внести поправки, учитывающие отличие реальности от допущенной идеализации (прежде всего, зависимость от температуры коэффициентов теплопроводности и излучательной способности).

Калибровочные измерения можно сделать, исполь-

зую резистивный электронагреватель, тепловыделение в котором на 100% обусловлено потребляемой электроэнергией (точное измерение которой не представляет проблемы). Для этого надо измерить мощности нагрева, требующиеся для установления в некоторой точке устройства определенных температур. Понятно, что эти измерения необходимо делать, когда устройство достигает состояния, близкого к тепловому равновесию. В описываемом в этой статье теплогенераторе для этого требовалось 20 – 30 минут.

Для проведения калибровочных измерений можно использовать само устройство, но измерения должны быть сделаны таким образом, чтобы тепловыделение происходило только в резистивном нагревателе. Опыт показывает, что до температуры 1000°C в никеле, насыщенном водородом, не происходит заметных выделений или поглощений энергии. Эту область температур можно использовать для построения низкотемпературной части калибровочной кривой. В нашем случае появилась возможность дополнить эти измерения измерениями при более высокой температуре после того, как ресурс работы устройства полностью исчерпался. Кроме того, измерения после исчерпания ресурса при низкой температуре показали, что ход зависимости за время 7-месячной работы заметно не изменился.

Результаты калибровочных измерений и аппроксимирующая кривая показаны на рис. 7. Видно, что качество аппроксимации вполне удовлетворительное.

На рис. 8 представлены результаты измерений, полученные до исчерпания ресурса выработки избыточного тепла. Видно, что измерения при температурах ниже 1000°C дают результаты, близкие к калибровочной кривой. При более высоких температурах результаты измерений располагаются ниже калибровочной кривой, что указывает на наличие тепловыделения, дополнительного к электронагреву. Температура устанавливается в результате суммирования тепла, выделяемого электронагревателем, и дополнительного тепла. Разница ординат калибровочной кривой и результата измерения есть мощность дополнительного тепловыделения. Отношение мощности общего тепловыделения к мощности затраченной электроэнергии (COP) можно найти как отношение ординаты калибровочной кривой к мощности, потреблявшейся электронагревателем.

V. АНАЛИЗ ИЗОТОПНЫХ И ЭЛЕМЕНТНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ В ТОПЛИВЕ И КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛАХ

Наработка избыточной энергии за более чем семимесячную работу теплогенератора (4100 МДж) сравнима с наработкой на теплогенераторе России в Лугано (5800 МДж) [7], [8], анализ топлива которого показал весьма значительные изотопные изменения в никеле и литии. Можно было ожидать сильные изотопные изменения и в топливе нашего теплогенератора. Но анализы, сделанные в НИЦ “СИНТЕЗТЕХ” и университете Упсала в Швеции (там же, где был сделан анализ топлива теплогенератора России), не обнаружили существенных

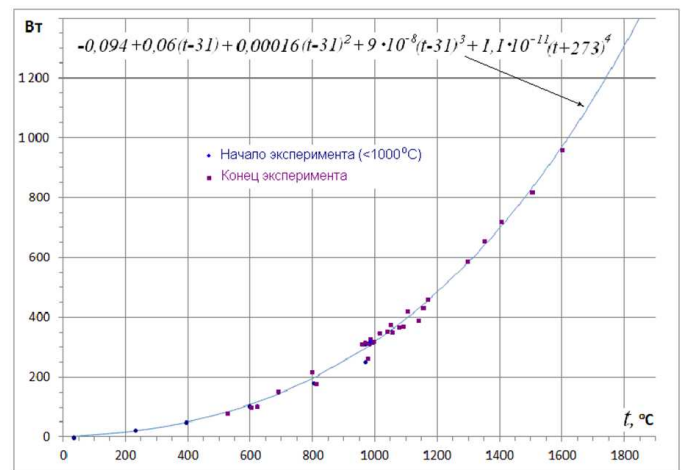


Рис. 7. Зависимость потребляемой мощности от температуры внутри теплогенератора при калибровочных измерениях. Вверху показан полином, аппроксимирующий эту зависимость. Представлены результаты измерений, полученные в первый день работы теплогенератора при температуре < 1000°C и в последние дни после прекращения избыточного тепловыделения.

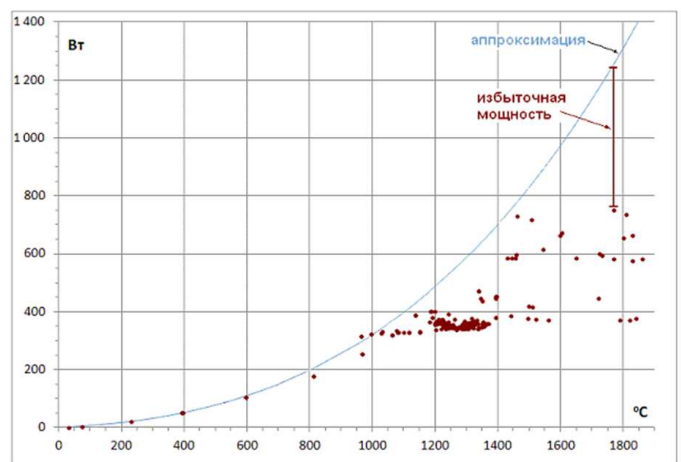


Рис. 8. Температура и потребляемая электрическая мощность при работе теплогенератора до исчерпания ресурса.

изотопных аномалий в никеле, “отработавшем” в нашем теплогенераторе (см. таблицу I).

В университете Упсала, помимо анализа присланных нами образцов, сделан анализ никелевого стандарта. Этот анализ, так же как и анализ образца “до”, дал результаты, отличающиеся от данных из справочника [9], что указывает на наличие в этих измерениях систематической ошибки. Перед анализом образцы растворились в смеси HCl + HNO₃, однако образец “после” растворился лишь частично. Остаток был сплавлен с боратом лития, после чего он полностью растворился в азотной кислоте. Результаты анализов с использованием двух способов растворения показаны в таблице в столбцах “после 1” и “после 2”. Отличия от анализов стандарта и исходного никеля лежат в пределах возможной ошибки.

Анализ исходного никеля, сделанный в НИЦ “СИНТЕЗТЕХ” показал результаты, близкие к данным из

Таблица I

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗОТОПНОГО АНАЛИЗА НИКЕЛЯ МЕТОДОМ ICP-MS (МАСС-СПЕКТРОМЕТРИЯ С ИНДУКТИВНО-СВЯЗАННОЙ ПЛАЗМОЙ) ДО И ПОСЛЕ РАБОТЫ В ТЕПЛОГЕНЕРАТОРЕ, АТОМНЫЕ %

	Синтезтех		Упсала			Справочник	
	До	После	Стандарт	До	После1		После2
Ni-58	68,22	68,35	65,15	65,31	64,87	64,80	68,27
Ni-60	25,99	26,26	28,20	28,02	28,49	27,63	26,10
Ni-61	1,32	0,86	1,27	1,25	1,27	1,36	1,13
Ni-62	3,54	3,61	4,19	4,20	4,21	4,56	3,59
Ni-64	0,91	0,91	1,19	1,22	1,17	1,65	0,91



Рис. 9. Реактор после завершения работы. Показано содержание элементов (%) в некоторых местах, где были взяты пробы. Остальную массу в основном дают входящие в состав керамики Al и Si.

справочника [9]. Заметим, что содержание ^{64}Ni не определялось в связи с возможным наложением ^{64}Zn , поэтому в таблице приведены данные для этого изотопа из справочника [9]. Измерения показали заметное снижение содержания ^{61}Ni , однако этот результат не подтвердился анализом, сделанным в Упсала.

Кроме никеля, в НИЦ «СИНТЕЗТЕХ» был сделан анализ изотопного состава вольфрамового провода нагревателя до и после пребывания в теплогенераторе. Изменений в изотопном составе не обнаружено.

Заметим, что существенных изменений не обнаружено не только в описываемом, но и ни одном из никель-водородных реакторов, где делались такие анализы [10], [11], [12], [13], [14]. Реактор в Лугано [7], [8] является исключением.

Анализ элементного состава вещества образцов, взятых в разных местах теплогенератора, сделан в НИЦ «СИНТЕЗТЕХ» и ООО «АМТЕРТЕК» методом энергодисперсионной рентгено-флуоресцентной спектроскопии. Отметим, что этот метод анализирует поверхностный слой вещества и не позволяет определять элементы легче алюминия. Обнаружено множество элементов, в том числе, изначально в топливе и конструкционных материалах практически отсутствующих (V, Ga, Co, Sr, Yb, Hf). Особенно много появилось кальция. Во внутренней керамической трубке содержание кальция достигло 23% при исходном содержании около 1%. Некоторые из результатов показаны на рис. 9 и 10.

На этих рисунках показаны места, где были взяты пробы, и массовый процент тех элементов, содержание которых возросло многократно.

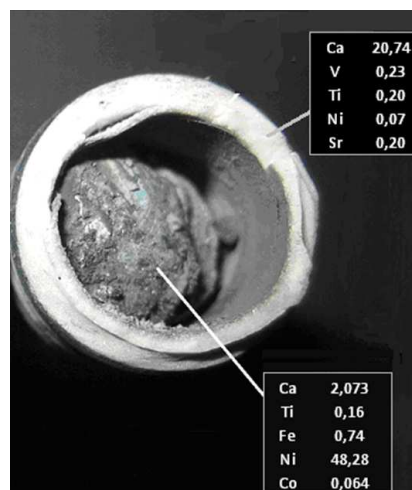


Рис. 10. Поперечный разрез внутренней трубки. Показано содержание элементов (%) во внутренней керамической трубке и в слитке, образовавшемся в центральной зоне. Остальную массу в основном дают входящие в состав керамики Al и Si.

VI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Оптимизация конструкции, применение более жаростойких конструкционных материалов и надежная

герметизация позволили достичь 7-месячной длительности работы никель-водородного теплогенератора при избыточной мощности до 1 кВт. Превышение мощности тепловыделения над потребляемой электрической мощностью достигало 3,6. Суммарное выделение избыточного тепла около 4100 МДж (2,1 МэВ на 1 атом никеля). Такая энергия выделяется при сгорании 100 л нефтепродуктов.

В ходе процессов, происходивших в теплогенераторе, произошли изменения элементного состава вещества. Обнаружено множество элементов, в том числе, изначально в топливе и конструкционных материалах практически отсутствующих (V, Ga, Co, Sr, Yb, Hf). Особенно сильно возросло содержание кальция. Значительных изменений в изотопном составе никеля, а также вольфрама, не обнаружено.

Мы выражаем глубокую благодарность И.Н. Степанову за помощь с материалами и оборудованием, В.А. Карabanову, сотрудникам НИЦ «СИНТЕЗТЕХ» и ООО «АМТЕРТЕК» за высококачественные анализы, Во Нёистад за конструктивное внимание к нашим работам и содействие в проведении анализов в университете Упсала, и всем апологетам холодных ядерных трансмутаций, без поддержки которых наша работа была бы невозможна.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Пархонов А.Г., Алабин К.А., Андреев С.Н. и др. Никель-водородные реакторы: тепловыделение, изотопный и элементный состав топлива. *РЭНСИТ*, 9(1):74–93, 2017.
- [2] Пархонов А.Г., Алабин К.А., Андреев С.Н., Забавин С.Н., Соболев А.Г., Тимербулатов Т.Р. Экспериментальные исследования никель-водородных реакций с аномально высоким тепловыделением. *Прикладная физика и математика*, (5):3–24, 2017.
- [3] Пархонов А.Г. Длительные испытания никель-водородных теплогенераторов в проточном калориметре. *ЖФНН*, 4(12-13):74–79, 2016. <http://www.unconv-science.org/pdf/12/parkhomov-ru.pdf>.
- [4] Бажутов Ю.Н., Герасимова А.И., Корецкий В.П., Пархонов А.Г. Особенности потребления электроэнергии, выделения тепла и излучения в процессе плазменного электролиза. Материалы 21-й РКХТЯ и ШМ, Москва, 2015, с.122.
- [5] Пархонов А.Г. Исследование аналога высокотемпературного теплогенератора России. *ЖФНН*, 3(7):68–72, 2015.
- [6] Климов А.И., Белов Н.К., Толкунов Б.Н. Выделение тепловой энергии в водяном реакторе при импульсно-периодическом подводе электрической энергии. Материалы 24-й РКХТЯ и ШМ, Москва, 2018, с.65–72.
- [7] Levi G., Foschi E, Høistad B. Observation of abundant heat production from a reactor device and of isotopic changes in the fuel. – <http://www.sifferkoll.se/sifferkoll/wp-content/uploads/2014/10/LuganoReportSubmit.pdf>.
- [8] Пархонов А.Г. Отчет международной комиссии об испытании высокотемпературного теплогенератора России. *ЖФНН*, 2(6):57–61, 2014. <http://www.unconv-science.org/pdf/6/parkhomov2-ru.pdf>.
- [9] www.dpva.ru/Guide/GuideChemistry/PeriodicalMendeleevTable/IsotopiAbundance1.
- [10] Алабин К.А., Андреев С.Н., Пархонов А.Г. Результаты анализа изотопного и элементного состава топлива никель-водородных реакторов. *ЖФНН*, 3(10):49–53, 2015. <http://www.unconv-science.org/pdf/10/alabin-ru.pdf>.
- [11] Пархонов А.Г., Алабин К.А., Андреев С.Н., Забавин С.Н., Соболев А.Г., Тимербулатов Т.Р. Изменения изотопного и элементного состава в никель-водородных реакторах. *ЖФНН*, 5(15-16):97–104, 2017. <http://www.unconv-science.org/pdf/15/parkhomov-ru.pdf>.
- [12] Пархонов А.Г., Забавин С.Н., Соболев А.Г., Тимербулатов Т.Р. Анализ изменений изотопного и элементного состава в высокотемпературных никель-водородных реакторах. *Прикладная физика и математика*, (4):9–19, 2017. <http://www.unconv-science.org/pdf/15/parkhomov-ru.pdf>.
- [13] Пархонов А.Г., Алабин К.А., Андреев С.Н., Забавин С.Н., Соболев А.Г., Тимербулатов Т.Р. Изменения изотопного и элементного состава в никель-водородных реакторах. Материалы 24 Российской конференции по холодной трансмутации ядер химических элементов. Дагомыс, Сочи, 17 - 24 сентября 2017, с. 72-85.
- [14] Alabin K.A., Andreev S.N., Zabavin S.N., Parkhomov A.G., Sobolev A.G., Timerbulatov T.R. Isotopic and Elemental Composition of Substance in Nickel-Hydrogen Heat Generators. *J. Condensed Matter Nucl. Sci.*, 26:32, 2018. <http://www.unconv-science.org/pdf/15/parkhomov-ru.pdf>.