

РАСЧЕТНЫЙ АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК АММИАЧНОГО ВОДНО-ГАЗОВОГО ХИМИЧЕСКОГО РЕЖИМА ПЕРВОГО КОНТУРА РЕАКТОРНОЙ УСТАНОВКИ РИТМ-200 УНИВЕРСАЛЬНОГО АТОМНОГО ЛЕДОКОЛА ПРОЕКТА 22220

*Коротаяева Дарья Дмитриевна, Кулаков Игорь Николаевич,
Лепехин Андрей Николаевич (lepehin@okbm.nnov.ru)*

АО «ОКБМ Африкантов», г. Нижний Новгород

В реакторной установке (РУ) РИТМ-200 универсального атомного ледокола ПРОЕКТА 22220 в 1-ом контуре принят к эксплуатации аммиачный водно-газовый химический режим (АВГХР). Опыт многолетней эксплуатации ледокольных ядерно-энергетических установок с АВГХР 1-го контура показал его надежность, стабильность и простоту в организации и поддержании [1]. Целями организации АВГХР является поддержание качества теплоносителя в соответствии с требованиями нормативной документации, обеспечивающего заданный ресурс оборудования 1-го контура, и взрывобезопасных условий нормальной эксплуатации РУ в результате подавления образования в 1-ом контуре радиолитического кислорода. В соответствии с нормами качества теплоносителя концентрация аммиака в теплоносителе 1-го контура при АВГХР составляет не менее 10 мг/кг [2].

Настоящий доклад посвящен расчетному анализу характеристик АВГХР 1-го контура при работе РУ в эксплуатационном диапазоне мощностей и расчетному подтверждению подавления образования в 1-ом контуре радиолитического кислорода при нормальной эксплуатации. В расчетном анализе использовалась методика, основанная на полуэмпирической зависимости между стационарными равновесными концентрациями компонентов АВГХР в теплоносителе в реальных реакторных системах.

Определение стационарных равновесных концентраций водорода и азота в теплоносителе 1-го контура осуществлялось в предположении установления стационарного состояния по концентрациям компонентов АВГХР.

В докладе описана технология создания и организации АВГХР, представлены результаты расчета его характеристик: концентраций аммиака, водорода и азота в теплоносителе 1-го контура, содержание водорода в рабочем газе систем компенсации давления (СКД), важных с точки зрения водородной безопасности.

Ключевые слова: РИТМ-200, ВГХР, равновесные концентрации, аммиак.

COMPUTATION ANALYSIS OF CHARACTERISTICS OF AMMONIA WATER-GAS CHEMISTRY OF RITM-200 PRIMARY CIRCUIT FOR 22220 MNIB PROJECT

*Korotayeva Darya Dmitrievna, Kulakov Igor Nikolaevich,
Lepyokhin Andrey Nikolaevich (lepehin@okbm.nnov.ru)*

Afrikantov OKBM Joint-Stock Company, Nizhny Novgorod

The ammonia water-gas chemistry (WGC) was accepted for operation in the RITM-200 primary circuit of the 22220 Project of Multi-Purpose Nuclear Icebreaker (MNIB). Multi-year operation experience of nuclear-power icebreakers with WGC of the primary circuit has revealed its reliability, stability and simplicity in arrangement and maintenance [1]. The goals of ammonia WGC arrangement are to keep the coolant quality, which provides prescribed life of the primary circuit equipment as per the regulatory documentation requirements, and explosion-proof conditions for normal reactor plant operation as a result of suppression of radiolytic oxygen generation in the primary circuit. The ammonia

concentration in the primary coolant in the ammonia WGC is not less than 10 mg/kg according to the coolant quality standards [2].

The present paper is devoted to the computational analysis of primary ammonia WGC characteristics under reactor plant operation in the operating power range and computational justification of suppression of radiolytic oxygen generation in the primary circuit under normal operation. The computational analysis used a computation procedure based on a semi-empirical dependence between steady-state equilibrium concentrations of ammonia WGC components in the coolant in actual reactor systems

The steady-state equilibrium concentrations of hydrogen and nitrogen in the primary coolant were determined in the assumption of setting of a steady state for concentrations of ammonia WGC components.

The paper presents a reactor plant and systems used for arrangement of the ammonia WGC, describes the process of its development and arrangement, shows the results of analyses of the following characteristics: concentrations of ammonia, hydrogen and nitrogen in the primary coolant, a hydrogen content in the working gas of a pressurizer system of the reactor plant which are important from the viewpoint of hydrogen safety.

Key words: RITM-200, WGC, equilibrium concentration, ammonia.

Введение

Организация АВГХР первого контура позволяет обеспечить:

– проектную коррозионную стойкость оболочек твэл в течение срока службы и требуемый ресурс эксплуатации активной зоны;

– проектную коррозионную стойкость конструктивных материалов оборудования первого контура;

– взрывобезопасные условия нормальной эксплуатации РУ с герметичным первым контуром;

– минимизацию отложений на поверхности твэл и теплообменной поверхности парогенератора;

– минимизацию накопления активированных продуктов коррозии;

– минимальное количество радиоактивных технологических отходов.

Данный доклад посвящен одной из целей организации АВГХР, а именно: обеспечению взрывобезопасных условий эксплуатации РУ во всех ее нормальных режимах работы с герметичным первым контуром.

При АВГХР, взрывобезопасные условия нормальной эксплуатации РУ с герметичным первым контуром достигаются:

– за счет подавления образования в теплоносителе первого контура окислительных продуктов радиолиза реакторной воды (образования в контуре радиолитического кислорода);

– за счет использования при ведении ВГХР принципиально невоспламеняемого при истечении в воздух состава рабочего газа в системе компенсации давления 1-го контура.

В качестве корректирующей добавки для подавления образования в контуре радиолитического кислорода используется избыточная концентрация растворенного водорода в теплоносителе первого контура на входе в активную зону. Избыточная концентрация водорода может быть обеспечена различными методами: например, дозированием газообразного водорода в теплоноситель, введением водорода в со-

став рабочего газа РУ, применяемого для организации АВГХР теплоносителя первого контура и т. д. При использовании АВГХР, в теплоноситель первого контура вводится аммиак, а растворенный в реакторной воде водород появляется в результате радиационно-химического его разложения на водород и азот в соотношении 3:1 под воздействием радиационного излучения реактора.

Критерием подавления образования радиолитического кислорода в первом контуре является поддержание избыточной концентрации водорода в реакторной воде на входе в активную зону не менее 3 нсм³/кг при эксплуатации установки на мощности и 1 нсм³/кг – при эксплуатации остановленного реактора.

При организации АВГХР состав рабочего газа в технологических средах (воде и газе) первого контура должен удовлетворять требованиям обеспечения водородной безопасности при их технологических сбросах в системы РУ с воздушной атмосферой. По данным ВНИИПО МВД России принципиально невоспламеняемыми при истечении в атмосферный воздух являются водородно-азотные смеси с содержанием водорода до 6,5 % об., при параметрах РУ – до 5,5 % об. [3]. При более высоких содержаниях водорода должен осуществляться детальный анализ обеспечения водородной безопасности при технологических сбросах сред (воды и газа) в системы РУ с воздушной атмосферой.

Организация и ведение АВГХР

Организация требуемого АВГХР первого контура осуществляется перед каждым вводом РУ в действие после перегрузки реактора. В организации и поддержании АВГХР используются следующие системы первого контура и связанные с ним системы:

- система основного контура циркуляции;
- система компенсации давления (СКД);
- система очистки и расхолаживания;
- система газа высокого давления;

- система водоподготовки, заполнения и подпитки;
- система отбора проб;
- система газоудаления;
- система ввода химреагентов.

Система основного контура циркуляции, система компенсации давления и система очистки и расхолаживания входят в состав системы первого контура.

Технология организации АВГХР заключается в следующем:

- осуществляется воздухоудаление из верхних точек оборудования первого контура до полного заполнения оборудования теплоносителем;
- осуществляется поддренирование теплоносителя 1-го контура до его заданного исходного уровня в СКД с одновременной подачей в нее азота до исходного давления – (5÷5,3) МПа;
- осуществляется обескислороживание теплоносителя первого контура в результате введения в него гидразин-гидрата и доведения содержания кислорода в реакторной воде до требований «Нормы качества воды...»;
- осуществляется ввод в теплоноситель аммиака до его исходной концентрации в реакторной воде 100 мг/г.

В дальнейшем осуществляется разогрев РУ и ее вывод на заданную мощность.

Методика расчета

Расчет характеристик АВГХР основан на полуэмпирической зависимости между стационарными равновесными концентрациями его компонентов (водорода, азота и аммиака) в теплоносителе первого контура [4]:

$$C_{\text{NH}_3}^{\text{рав}} = C_{\text{H}_2}^w \cdot (C_{\text{N}_2}^w)^{0,58} \cdot K_{\text{рад}}, \quad (1)$$

где $C_{\text{NH}_3}^{\text{рав}}$, $C_{\text{H}_2}^w$, $C_{\text{N}_2}^w$ – стационарные равновесные концентрации аммиака (мг/кг), водорода (норм. см³/кг) и азота (норм. см³/кг) в теплоносителе 1-го контура; $K_{\text{рад}}$ – константа радиационно-химического равновесия аммиака, определяемая равенством скоростей радиационно-химического синтеза и разложения аммиака в теплоносителе (мг·кг^{0,58})/(норм. см³)^{1,58}.

Дополнительно используется взаимосвязь между концентрациями растворенных газов в теплоносителе и их содержанием в парогазовой среде СКД в стационарном равновесном режиме (закон Генри для условий на поверхности раздела фаз в КД):

$$C_{gi}^w = P_{gi}^{\text{СКД}} \cdot H_{gi}^w, \quad (2)$$

где $P_{gi}^{\text{СКД}}$ – парциальные давления i -го газа (водорода, азота) в парогазовой среде СКД, бар; H_{gi}^w – константа растворимости i -го газа в воде, норм. см³/(кг·бар).

Константа радиационно-химического равновесия в соотношении (1) зависит от уровня мощности РУ (мощности поглощенной в теплоносителе энергии реакторного излучения, температуры теплоносителя и т. д.).

Соотношение (1) верифицировано по результатам экспериментов на исследовательских реакторных установках и по результатам опыта эксплуатации ледокольных РУ.

На рис. 1 приведена полученная в экспериментах зависимость константы радиационно-химического равновесия от относительной мощности РУ.

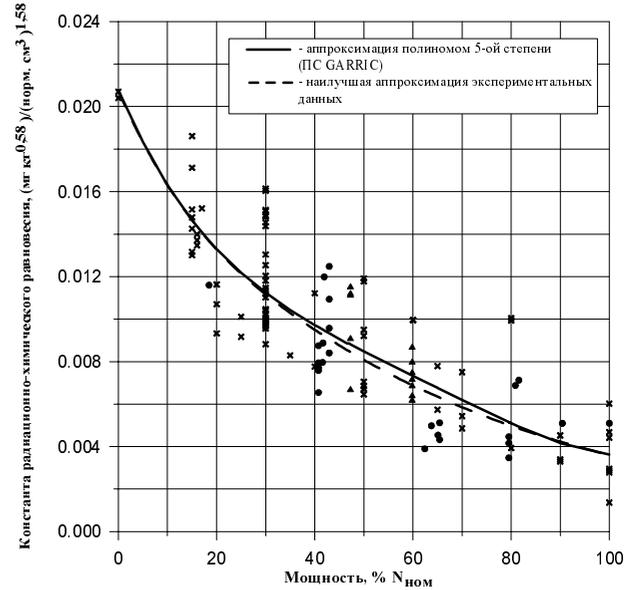


Рис. 1. Зависимость константы радиационно-химического равновесия от мощности РУ

Представленная на рис. 1 зависимость хорошо аппроксимируется полиномом:

$$K_{\text{рад}} = 0,0207597 - 0,000535166 \cdot \bar{N} + 1,00837 \cdot 10^{-5} \cdot (\bar{N})^2 - 1,07238 \cdot 10^{-7} \cdot (\bar{N})^3 + 4,27877 \cdot 10^{-10} \cdot (\bar{N})^4, \quad (3)$$

где $\bar{N} = N/N_{\text{ном}}$.

Зависимость константы радиационно-химического равновесия от мощности нормирована на номинальную тепловую мощность атомных ледоколов 200 МВт.

На рис. 2 представлено сравнение результатов расчета стационарной равновесной концентрации аммиака в теплоносителе с результатами ее измерения в реакторных экспериментах. Измерение стационарных равновесных концентраций компонентов АВГХР в теплоносителе 1-го контура (водорода, азота, аммиака) осуществлялось путем отбора проб теплоносителя и анализа проб на содержание газов и аммиака по стандартизированным методикам. Погрешность измерения содержания растворенных в теплоносителе газов не превышала 25 %, аммиака – 0,5 %. Периодичность отбора проб составляла от 0,5 до 1 суток. Режимы работы считались стационарными

ми по концентрациям компонентов АВГХР, если результаты анализа в 3-х последних пробах не превышали погрешности их измерения, и отсутствовала тенденция к их монотонному изменению.

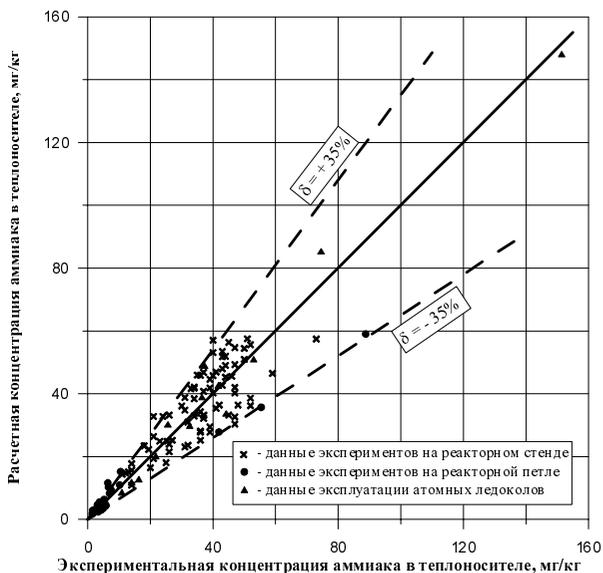


Рис. 2. Сравнение расчетной равновесной концентрации аммиака с результатами реакторных экспериментов

Как следует из рис. 2, погрешность расчета стационарных равновесных концентраций NH_3 с использованием данного соотношения не превышает 35 %.

На рис. 3 приведена зависимость отношения концентрации аммиака к концентрации водорода в теплоносителе первого контура от концентрации азота. Там же приведено сравнение результатов расчета по соотношению (1) с опытными данными для атомных ледоколов, имеющих различную номинальную тепловую мощность.

Рис. 3 показывает удовлетворительное согласие результатов расчета с экспериментом.

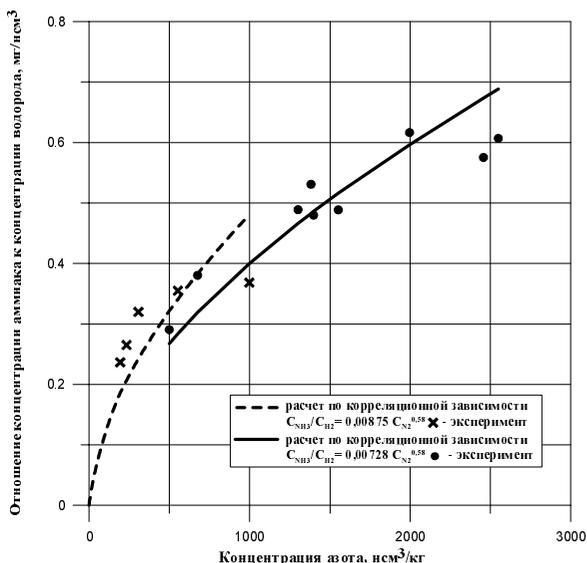


Рис. 3. Сравнение расчета с опытными данными для ледоколов

Исходные данные и постановка расчета

При проведении расчетов стационарных равновесных концентраций аммиака в теплоносителе в эксплуатационном диапазоне мощностей использовались исходные данные, приведенные в таблице.

Исходные данные для расчета равновесных концентраций компонентов АВГХР в теплоносителе 1-го контура РУ РИТМ-200

№ п/п	Наименование параметра, характеристики	Значение
1	Давление в 1 контуре при работе РУ в эксплуатационном диапазоне мощностей $10 \div 100 \% N_{ном}$, МПа	постоянное 15,7
2	Температура воды и газа в КД при работе РУ в эксплуатационном диапазоне мощностей $10 \div 100 \% N_{ном}$, °С	постоянная 80
4	Масса холодного теплоносителя в ПГБ, кг	24797
5	Масса холодного теплоносителя в СКД, кг	8509
6	Масса холодного теплоносителя в пределах системы очистки, кг	1189
7	Количество емкостей КД, шт	2
8	Количество ГА, шт	2
9	Количество ЕГА, шт	2
10	Объем газовой подушки в одном КД при работе РУ на номинальной мощности, м ³	0,8
11	Объем газовой подушки в одном ГА при работе РУ на номинальной мощности, м ³	1,7
12	Объем газовой подушки в одном ЕГА при работе РУ на номинальной мощности, м ³	1

Постановка расчета:

– расчет проведен на начало кампании реактора – образование коррозионного водорода и уход водорода за пределы среды (воды и газа) первого контура (растворение в металлах, образование гидридов, утечка через металл) не учитывались;

– использовалось приближение идеального газа;

– время непрерывной работы РУ на одном уровне мощности без корректировок АВГХР – не менее 5 суток (время достижения стационарного равновесного состояния по концентрациям аммиака в теплоносителе).

Результаты расчета

Были проведены расчеты параметров аммиачного ВГХР первого контура при работе РУ РИТМ-200 в эксплуатационном диапазоне мощностей 10–100 % $N_{ном}$. Расчеты проведены при варьировании исходных концентраций аммиака в реакторной воде перед вводом РУ в действие (перед разогревом РУ). Результаты расчетов представлены на рис. 4–7.

В соответствии с постоянным рабочим давлением в 1-ом контуре и постоянной температурой воды и газа в КД концентрация растворенного азота в теплоносителе 1-го контура при работе РУ в эксплуатационном диапазоне мощностей практически не зависит от мощности РУ и составляет $1130 \div 1140$ норм. $\text{см}^3/\text{кг}$.

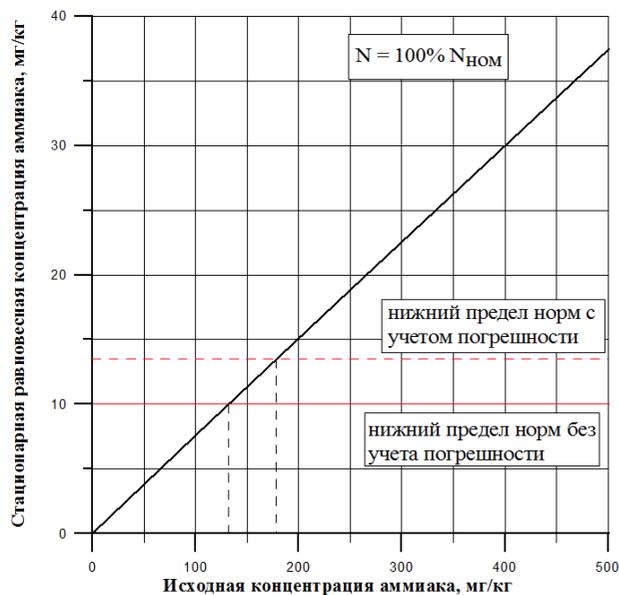


Рис. 4. Зависимость равновесной стационарной концентрации аммиака в теплоносителе от его исходной концентрации в реакторной воде

На рис. 4 приведена зависимость стационарной равновесной концентрации аммиака в теплоносителе 1-го контура от его исходной концентрации в реакторной воде перед вводом РУ в действие, а на рис. 5 – зависимость стационарной равновесной концентрации аммиака от мощности РУ. Из рис. 5 следует, что минимальная стационарная равновесная концентрация аммиака в теплоносителе реализуется при работе РУ на номинальном уровне мощности. Как видно из рис. 4, имеет место практически линейная зависимость стационарных равновесных концентраций аммиака в теплоносителе, от исходной концентрации аммиака. Аналогичные зависимости от исходной концентрации аммиака в реакторной воде наблюдаются для стационарных равновесных концентраций водорода в теплоносителе и рабочем газе СКД РУ.

Из рис. 4 и 5 также следует, что для обеспечения норм качества теплоносителя по аммиаку ($10 \div 100$ мг/кг [2]) исходная концентрации аммиака в реакторной воде должна составлять не менее 131,7 мг/кг – без учета погрешности расчета по соотношению (1) и не менее 178,3 мг/кг – с ее учетом. При этом минимально допустимая концентрация аммиака с учетом погрешности расчета по соотношению (1) в 35 % составляет 13,5 мг/кг.

Для поддержания концентраций аммиака в теплоносителе в пределах норм при выводе РУ на номинальную мощность с обеспечением последующей ее непрерывной работы в этом режиме не менее 5 суток, потребуется проведение не менее 2-х ÷ 3-х

подпиток аммиака в первый контур с доведением его концентрации до верхней границы норм (100 мг/кг).

На рис. 6 и 7 представлены зависимости стационарных равновесных концентраций водорода в теплоносителе первого контура и его содержания в рабочем газе СКД от мощности РУ РИТМ-200 при необходимых исходных концентрациях аммиака ($131,7$ мг/кг – без учета погрешности расчета по соотношению (1) и $178,3$ мг/кг – с ее учетом).

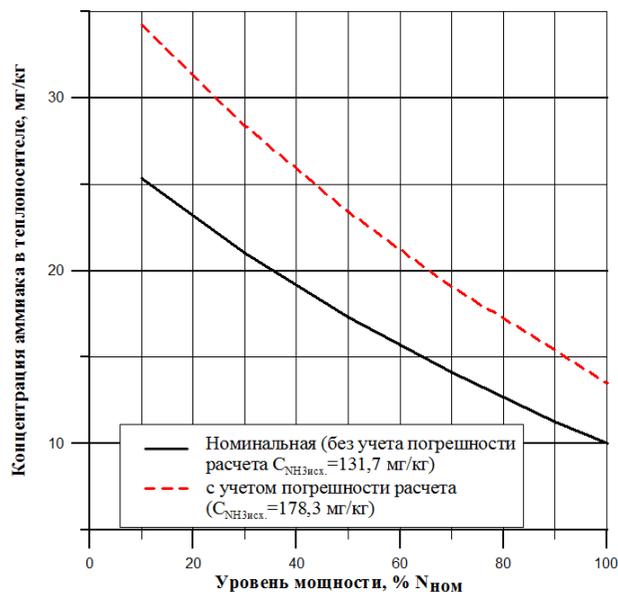


Рис. 5. Зависимость равновесной стационарной концентрации аммиака в теплоносителе от мощности РУ

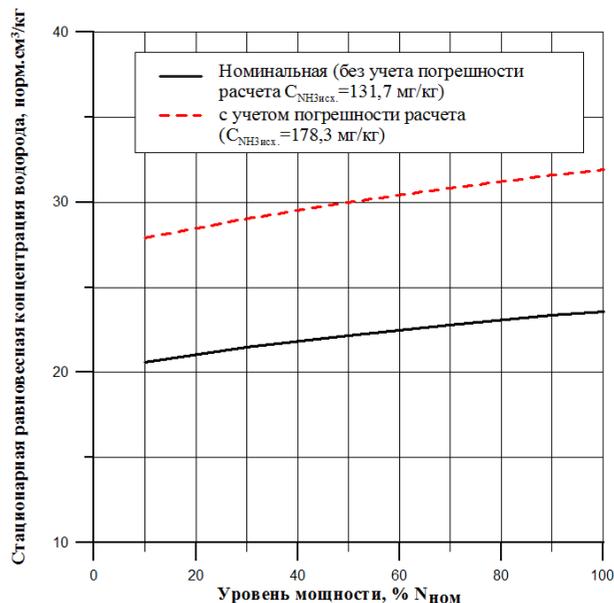


Рис. 6. Зависимость равновесной стационарной концентрации водорода в теплоносителе от мощности РУ

Как показывает рис. 6, стационарные равновесные концентрации водорода в теплоносителе первого контура обеспечиваются на уровне $21 \div 32$ норм. $\text{см}^3/\text{кг}$ и с большим запасом обеспечивают подавление образования окислительных продуктов радиолитического

лекулярного кислорода) при эксплуатации РУ на мощности. При этом содержание водорода в рабочем газе СКД не превышает 1,3 % об., что значительно ниже допустимого по условиям обеспечения водородной взрывобезопасности. Таким образом, критерии обеспечения взрывобезопасных условий нормальной эксплуатации РУ РИТМ-200 с герметичным 1-м контуром обеспечиваются.

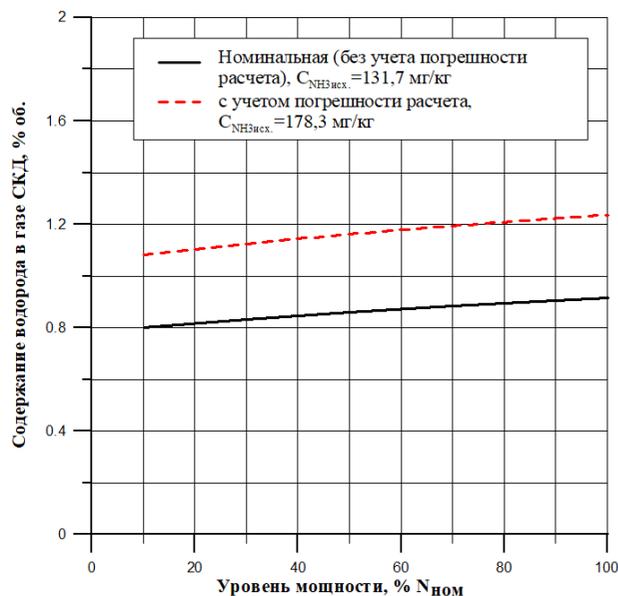


Рис. 7. Зависимость содержания водорода в рабочем газе СКД от мощности РУ

Заключение

1. В настоящем докладе проведен расчетный анализ характеристик аммиачного ВГХР первого контура реакторной установке РИТМ-200 при ее работе в эксплуатационном диапазоне мощностей 10÷100% $N_{ном}$, с использованием программы Mathcad. Расчеты проведены на начало кампании реактора без учета образования коррозионного водорода и его стоков за пределы рабочих сред (воды и газа) 1 контура.

2. В процессе работы предложена, разработана и верифицирована методика расчета стационарных равновесных концентраций компонентов аммиачного ВГХР в теплоносителе и состава рабочего газа в СКД первого контура.

3. Для гарантированного обеспечения стационарной равновесной концентрации аммиака в теплоносителе во всем эксплуатационном диапазоне мощностей работы РУ не ниже нормируемой (10 мг/кг) исходная концентрация аммиака в реакторной воде должна составлять не менее 179 мг/кг. Ограничение по верхнему пределу аммиака (100 мг/кг) требует дополнительной 2÷3-х кратной подпитки аммиака в первый контур в начале кампании реактора или корректировки верхней границы норм с увеличением исходной концентрации аммиака перед вводом РУ в действие до 180 мг/кг, если это возможно.

4. Подавление образования окислительных продуктов радиолиза воды (радиолитического кислорода, а также нитратов и нитритов) в процессе нормальной эксплуатации РУ на мощности и взрывобезопасные условия в первом контуре и в ПЭБ при технологических сбросах среды (воды или газа) из первого контура обеспечиваются.

5. Направлением дальнейших исследований является проведение расчетного анализа в другие моменты кампании реактора с учетом образования коррозионного водорода и его стоков за пределы рабочих сред первого контура.

Список литературы

1. Касперович А. И., Колесов Б. И., Сандлер Н. Г. Водно-химические процессы в реакторных установках атомных ледоколов и плавучих энергоблоков. – Атомная энергия, 1996, т. 81, вып. 4.
2. Нормы качества воды первого и третьего контуров реакторной установки судов департамента морского транспорта российской федерации с вододяными реакторами типа КЛТ-40. Технические требования к качеству воды, контроль и способы обеспечения. ОСТ 95 10002-95.
3. Гельфанд Б. Е., Попов О. Е., Чайванов Б. Б. Водород: параметры горения и взрыва. М. ФИЗМАТЛИТ, 2008.
4. Программное средство GARRIC 2.2 Отчет о верификации и обосновании программного средства, применяемого для обоснования безопасности ОИАЭ. Том II. Тестирование программы и результаты верификации на экспериментальных данных, полученных на теплофизических стендах. Отчет АО «ОКБМ Африкантов», инв. № 12332/13, Н. Новгород, 2012.