УДК 621.039:544

Результаты опытно-промышленной эксплуатации автоматизированного комплекса аналитического контроля ионного состава водных сред конденсатно-питательной системы стендовой ЯЭУ (КАИССА)

Н. Я. Вилков, С. В. Блинов, А. А. Петухов, А. В. Жижин

ФГУП «НИТИ им. А. П. Александрова», г. Сосновый Бор Ленинградской области, Россия

Аннотация

Рассмотрены и обобщены результаты натурных испытаний автоматизированного комплекса оперативного и исследовательского аналитического контроля ионного состава водных сред конденсатно-питательной системы (КАИССА), позволившие впервые в условиях эксплуатации полномасштабной стендовой ЯЭУ транспортного типа получить:

– состоятельные и эффективные статистические оценки среднеэксплуатационного уровня значений интегральных и индивидуальных показателей ионного состава водных сред конденсатно-питательной системы в различных режимах эксплуатации объекта;

– расширенный объем экспериментальной информации о характере внутриконтурных физико-химических процессов, формирующих ионный состав водных сред конденсатно-питательной системы объекта, на основе «процессного подхода» и общей теории систем автоматического управления;

– экспериментальные данные для построения эффективной модели ранней идентификации и прогноза развития «течи перед разрушением» трубопроводов охлаждающей воды главного конденсатора транспортной ЯЭУ по данным аналитического контроля;

– исходные данные для дальнейшего развития функциональных возможностей систем аналитического контроля применительно к задачам ранней идентификации отклонений оборудования конденсатно-питательных систем объектов энергетики от базового состояния.

Полученные данные являются необходимыми и достаточными для разработки концепции и исходных технических требований к объему функций, видам обеспечения, эксплуатационным и технико-экономическим характеристикам унифицированных автоматизированных комплексов оперативного аналитического контроля ионного состава водных сред и диагностики состояния оборудования конденсатно-питательной системы транспортных ЯЭУ и других объектов атомной и тепловой энергетики.

Ключевые слова: объекты атомной энергетики, конденсатно-питательные системы, ионный состав, внутриконтурные физико-химические процессы, аналитический контроль, автоматизация.

UDC 621.039:544

The results of experimental trial of an automated complex for analytical monitoring of ion content in aqueous media of NPP condensate-feeding system (KAISSA)

N. Ya. Vilkov, S. V. Blinov, A. A. Petuhov, A. V. Zhizhin

FSUE «Alexandrov Research Institute of Technology», Sosnovy Bor, Leningrad region, Russia

Abstract

The paper presents the results from experimental trial of an automated complex for analytical monitoring of ion content in aqueous media of NPP condensate-feeding system (KAISSA). These test results obtained during operation of the full-scope simulator of a naval reactor plant (NRP) include:

– consistent and efficient statistical evaluation of average integrated and individual parameters for ion content in aqueous media of a condensate-feeding system under different operating conditions of the facility;

– large amount of experimental data on physico-chemical processes which occur in the reactor coolant circuit and influence the ion content in aqueous media of a condensate-feeding system;

– experimental data for building an effective model for early detection and prediction of "leak before break" accident progression in cooling water piping of the main NRP condenser using analytical monitoring data;

– input data for further development of analytical monitoring systems functionality as applied to early identification of condensate-feeding system equipment deviated from normal state.

The obtained data are necessary and sufficient to develop a concept and input requirements for functions, hardware, software, and technical and economic features of unified automated complexes used for operation monitoring of ion content in aqueous media and for diagnostics of condensate-feeding system equipment of NRPs and other nuclear and thermal power facilities.

Key words: nuclear facilities, condensate-feeding systems, ion content, physico-chemical processes, analytical monitoring, automation.

Цели и условия опытно-промышленной эксплуатации комплекса

Разработка и натурные испытания экспериментального образца автоматизированного комплекса КАИССА в условиях полномасштабного стенда-прототипа транспортных ЯЭУ имели целью:

– получение расширенного объема информации о характере внутриконтурных физико-химических процессов (ВФХП), формирующих ионный состав водных сред конденсатно-питательной системы (КПС) реального объекта, на основе «процессного подхода» с учетом известных положений теории управления и оптимизации процессов химических производств [1–4];

– оценку показателей качества экспериментального образца изделия по его функциональному назначению, эффективности и достаточности принятых методических и проектно-конструкторских решений для выбора направлений совершенствования всех видов обеспечения комплекса при переходе к повторяющемуся единичному производству [5–7].

В состав комплекса КАИССА, описанного ранее в работе [8], входят измерительные каналы (ИК), обеспечивающие:

– автоматическое получение, передачу по каналам связи результатов измерений показателя pH, удельной электропроводимости (УЭП), концентрации хлорид-ионов и ионов натрия в водных средах КПС в режиме непрерывного (по терминологии ГОСТ 16504–81) аналитического контроля (АК) on line;

– регистрацию текущих результатов измерений и формирование архивов измерительного АК программно-техническими средствами системы сбора данных (ССД).

Управление измерительными, измерительно-вычислительными и вспомогательными компонентами ИК в рутинных режимах эксплуатации комплекса реализуется с удаленного автоматизированного рабочего места (АРМ) оператора.

Заложенные при разработке автоматизированного комплекса КАИССА решения были направлены на повышение состоятельности, эффективности и точности измерительных оценок характера ВФХП в действительных условиях эксплуатации полномасштабной стендовой ЯЭУ за счет информационного резервирования, обеспечивающего получение и возможность углубленного статистического анализа результатов расширенного АК на основе принципов временной и структурной избыточности данных измерений [3–6].

Повышение метрологического качества и информативности АК характера ВФХП, формирующих состояние водных сред КПС в действительных условиях эксплуатации полномасштабной стендовой ЯЭУ, обеспечивалось средствами комплекса КАИССА за счет систематической оценки:

- случайной погрешности измерений для каждого из ИК в текущих действительных условиях прецизионности, реализуемых на объекте использования (при заданном периоде опроса 20 с с последующим усреднением результатов измерений на интервале 12 мин);
- значимости смещения результатов измерения без демонтажа измерительных и измерительно-вычислительных компонентов ИК в рабочем режиме с использованием стандартных образцов в виде растворов хлорида натрия или соляной кислоты в области концентраций не более 3×10^{-6} моль/дм^3, генерируемых устройством динамической калибровки (УДК-ИК), встроенным в гидравлическую схему комплекса [8, 9];
- взаимной корреляции характера поведения синхронно измеряемых интегральных (УЭП, pH) и индивидуальных (pCl, pNa) показателей ионного состава водных сред КПС;
- автоковариационной функции поведения каждого из индивидуальных показателей.

Систематические оценки указанных показателей проводились на достаточных временных интервалах наблюдений, обеспечивающих состоятельность массивов данных и эффективность используемых статистических критериев. В том числе сопоставлением с данными лабораторного анализа независимыми методами проб водных сред, периодически отбираемых на сливе среды после кондуктометра комплекса КАИССА.

Состояние технологической среды КПС оценивалось по результатам измерений ионного состава в следующих точках контроля:

- «До ФИ-1, 3» — конденсат пара после главного конденсатора;
- «До ФИ-2,4» — конденсат пара после главного конденсатора;
- «После ФИ-1» — питательная вода после ионообменного фильтра № 1;
- «После ФИ-2» — питательная вода после ионообменного фильтра № 1;
- «После ФИ-3» — питательная вода после ионообменного фильтра № 1;
- «После ФИ-4» — питательная вода после ионообменного фильтра № 4.

Минимальный период непрерывных измерений ионного состава в одной точке контроля с использованием комплекса КАИССА составил 240 минут, максимальное время измерений — 5 суток. За счет многократных наблюдений и последующего усреднения текущих результатов измерений на 12 минутном интервале (при n = 36 измерениям с периодом опроса ИК 20 с) случайная погрешность оценок центрального значения контролируемых ВФХП снижается в $\sqrt{n} = \sqrt{36} = 6$ раз по сравнению с паспортной точностью серийных средств изме-

рения, регламентируемой при их поверке или калибровке. Последнее является закономерным следствием временной избыточности данных измерений при фактических эксплуатационных условиях прецизионности, реализуемых на действующем объекте АК [4–7].

Экспериментальные данные измерений ионного состава водных сред КПС в эксплуатационных условиях стенда-прототипа

Недостаточная эффективность оценки характера поведения ионных примесей в наиболее чистых потоках КПС по результатам измерения только интегральных показателей (УЭП и pH) водных сред иллюстрируется данными, полученными при вводе объекта контроля в рабочий режим после кратковременного прекращения циркуляции технологической среды второго контура (рис. 1).

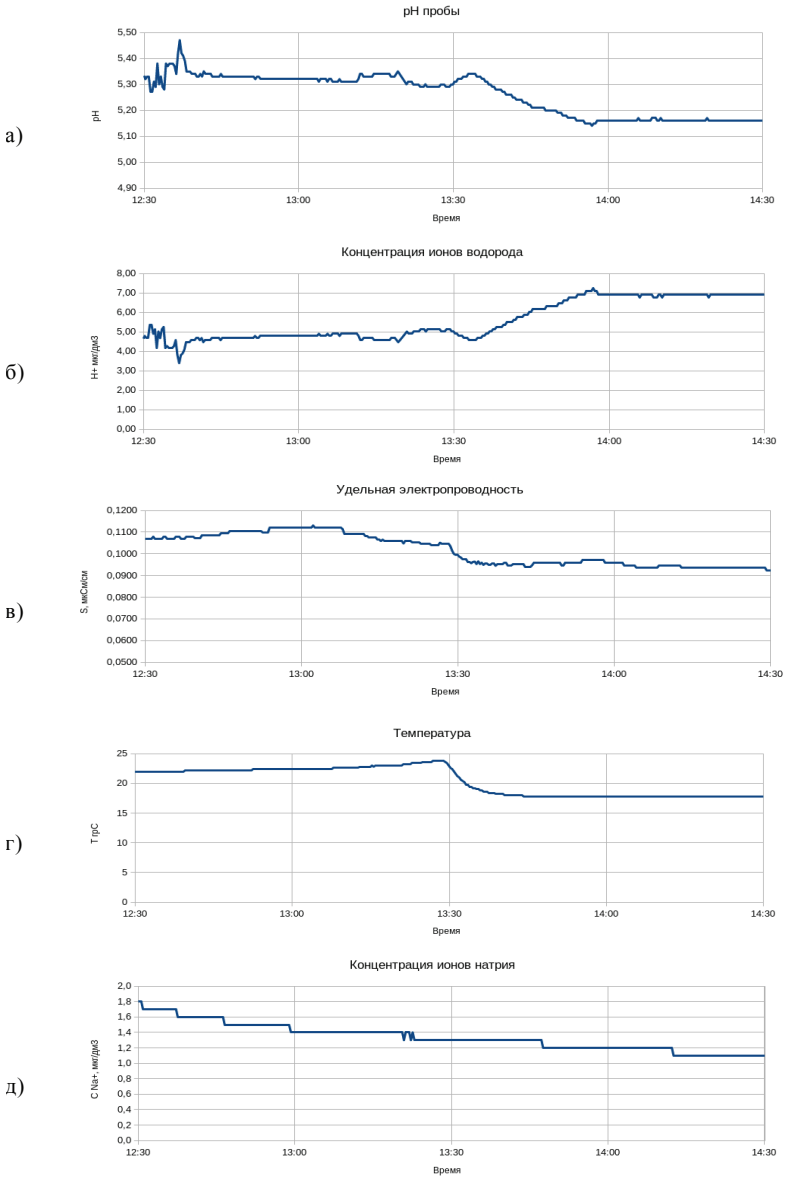

Рис. 1. Поведение ионных примесей в точке контроля «После ФИ-1» при вводе объекта в действие после кратковременного прекращения циркуляции технологической среды второго контура:

а) pH; *б*) концентрация ионов водорода [H^+=10(–pH)]; *в*) УЭП (с термокомпенсацией); *г*) температура пробы; *д*) концентрации ионов натрия.

Из представленных на рис. 1 данных расширенного АК следует, что при объяснимом снижении значения pH (повышении концентрации ионов водорода) по мере падения измеренной концентрации ионов натрия корреляция между значением показателя pH и УЭП является отрицательной. Указанные результаты измерений УЭП:

– противоречат известным закономерностям влияния концентрации ионных примесей в области менее 10^{-4} моль/дм3 на электропроводность электролитов;

– находят объяснение в недостаточной адекватности модели температурной коррекции показаний используемого серийного кондуктометра, принятой разработчиком, при измерениях УЭП сред КПС с неопределенным ионным составом (рис. 1 в и 1 г).

Полученные при опытно-промышленной эксплуатации комплекса КАИССА результаты оценок ионного состава показывают, что среднеэксплуатационные значения:

1) концентрации ионов натрия во всех точках контроля меньше нижней паспортной границы диапазона измерения измерительного канала ионов натрия «АТОН 801 МП» (0.7 мкг/дм^3);

2) концентрации хлорид-ионов в точках контроля после ионообменных фильтров не превысили значения 1.5 мкг/дм^3 (меньше нижней паспортной границы диапазона измерений для хлоридомера ХА-06);

3) концентрации хлорид-ионов в точках контроля после главного конденсатора не превысили значения 3.0 мкг/дм^3;

4) для измерительного канала pH, отградуированного по стандартным буферным растворам (4.01; 6.86; 9.18), характерно ранее установленное систематическое занижение pH [8], среднеэксплуатационные значения лежат в диапазоне от 4.70 до 6.66 pH;

5) для измерительного канала УЭП:

   – до ионообменных фильтров лежат в диапазоне от 0.095 до 0.139;

   – после ионообменных фильтров лежат в диапазоне от 0.084 до 0.119.

Для повышения надежности оценок действительной концентрации хлорид-ионов в средах КПС одновременно с использованием ИК комплекса КАИССА проводились измерения концентрации хлорид-ионов в лаборатории потенциометрическим методом по МВИ № 05-08-167М и методом ионной хроматографии по МВИ № 05-12-659М. Типичные результаты сравнения измерений показателя в средах КПС объекта комплексом КАИССА и с использованием МВИ лабораторного анализа представлены в табл. 1.

Отбор проб для лабораторного анализа проводился при стабильных значениях показаний ИК комплекса КАИССА в режиме *on line*. Оценки статистических характеристик параметров состояния ВФХП при их контроле комплексом КАИССА и средствами лабораторного анализа, проводились в соответствии с ГОСТ Р 50779.21-2004 «Правила определения и методы расчета статистических характеристик по выборочным данным».

Среднеквадратичное отклонение (СКО) для результатов измерения хлорид-ионов ИК в составе комплекса КАИССА, приведенных в табл. 1, оценивалось на интервале усреднения 12 минут перед началом отбора проб для лабораторного анализа. Погрешность результатов лабораторного анализа оценена с учетом нормированной точности:

– 40 % для нижней границы диапазона измерений 5 мкг/дм^3 по МВИ № 05-08-167М;

– 49 % для нижней границы диапазона измерений 0.5 мкг/дм^3 по МВИ № 05-12-659М.

Таблица 1

Результаты измерений концентрации хлорид ионов (C_{Cl^-}) в средах КПС комплексом КАИССА и лабораторными СИ.

Дата/ точка контроля	T,°C	КАИССА			МВИ № 05-08-167М (pα-011АМ)	МВИ №05-12-659М (ионная хроматография)
		C_{Cl^-}, мкг/дм^3	СКО $_{Cl^-}$, мкг/дм^3	Доверительный интервал (при P = 99.0 %), мкг/дм^3	C_{Cl^-}, мкг/дм^3	C_{Cl^-}, мкг/дм^3
20.06.18 за ФИ-1	22.3	1.3	1.1	±0.15	5.9	
27.06.18 до ФИ-1,3	19.7	1.3	0.86	±0.12	3.7	
28.06.18 до ФИ-1,3	21.0	1.3	1.00	±0.14	4.2	
03.07.18 до ФИ-1,3	16.9	1.1	0.77	±0.15	4.6	1.8
09.07.18 за ФИ-2	21.5	0.8	0.68	±0.09	4.3	1.4
11.07.18 за ФИ-3	18.7	0.5	0.66	±0.08	4.3	

Как было показано ранее [8], занижение результатов измерения концентрации хлорид-ионов комплексом КАИССА и ионохроматографическим методом по отношению к данным, получаемым хлоридомером pCl-011АМ, является следствием систематической ошибки «нулевого стандарта» при калибровке СИ с линейной ионной функцией по стандартным образцам с неопределенным содержанием хлоридов в воде для их приготовления. Методические причины наблюдаемого систематического смещения результатов измерения концентрации хлорид-ионов и показателя pH подтверждены результатами их оценки с использованием динамического калибровочного устройства УДК-ИК.

При этом полученные при ОПЭ комплекса оценки опорных значений показателей ионного состава образцов для оценивания, генерируемых УДК в условиях повторяемости, отвечали показателям точности, установленным для него Техническим заданием для диапазона рабочих температур от 20 °C до 30 °C, рабочих давлений на входе в УДК от 0.8 до 0.16 МПа и расходов среды от 4.0 до 16.0 дм^3/ч:

– для образцов pH в диапазонах генерации от 4.5 до 6.5 и от 7.5 до 9.5 не хуже ±0.1 pH;

– для образцов для оценивания pCl и pNa в диапазоне генерации от 7.0 до 5.5 pX не хуже ±0.1 pX

Ретроспективный анализ полученных при ОПЭ комплекса КАИССА результатов статистических оценок характера поведения контролируемых показателей ионного состава показал, что при работе стенда-прототипа транспортной ЯЭУ на мощности:

– средние значения результатов измерений в рутинных технологических режимах эксплуатации стендовой установки не выходили за уровни, установленные нормативными документами по ведению ВХР второго контура ЯЭУ, и совпадают с оценками, полученными на предыдущих этапах испытаний объекта [8];

– систематическое смещение показаний результатов измерения, обусловленное «естественными» методическими причинами не влияет на оценку динамики ВФХП, формирующих ионный состав сред КПС ЯЭУ.

На рис. 2 представлено поведение связанных показателей ионного состава рабочей среды в главном конденсаторе (ГК) по данным измерений, усредненных на четырехчасовом интервале. Анализ характера поведения связанных показателей ионного состава в среде «До ФИ - 1, 3» в конце периода наблюдений по данным, полученным с использованием ка-

налов измерения УЭП и концентрации хлорид-ионов комплекса КАИССА в течение двух суток (рис. 2), позволил сделать вывод о значимой потере герметичности трубопроводов охлаждающей воды ГК объекта.

Этот вывод в дальнейшем был подтвержден результатами:

– технологического контроля с использованием штатных средств измерения солесодержания и анализа отобранных проб в лабораторных условиях;

– визуального контроля состояния трубопроводов охлаждающей воды при вскрытии главного конденсатора для проведения операций заглушивания негерметичных элементов.

а)

б)

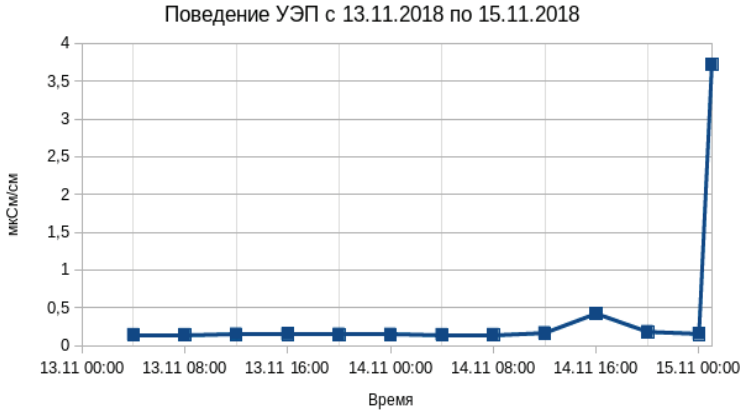

Рис. 2. Поведение связанных показателей ионного состава рабочей среды в главном конденсаторе по данным измерений, усредненных на четырехчасовом интервале:

а) концентрация хлорид-ионов; б) УЭП.

По мере развития инцидента комплексом КАИССА в точке контроля «До ФИ—1,3» фиксировалось устойчивое повышение УЭП и концентрации хлорид-ионов при значимом повышении значения показателя pH (рис. 3).

Последовательность действий оперативного персонала при обнаружении протечки представлена на том же рис. 3.

Выход, в конечном итоге, на положительную корреляцию изменяющихся значений pH, УЭП и концентрации хлорид-ионов (рис. 3) является дополнительным аргументом для вывода о том, что главной причиной повышения значений интегральных показателей рабочей среды ГК в рассматриваемом случае являлось поступление в конденсатор высокосолевых присосов:

– нивелирующих стандартную для нормальных условий эксплуатации объекта реализацию взаимосвязанных ВФХП вследствие грубого изменения ионной силы и соотношения индивидуальных ионных компонентов в средах КПС;

– изменяющих характер типичного отклика значений pH и УЭП высокочистых водных сред на вариацию концентрации неорганических ионов в пределах менее 10–6 моль/дм^3 [10,11].

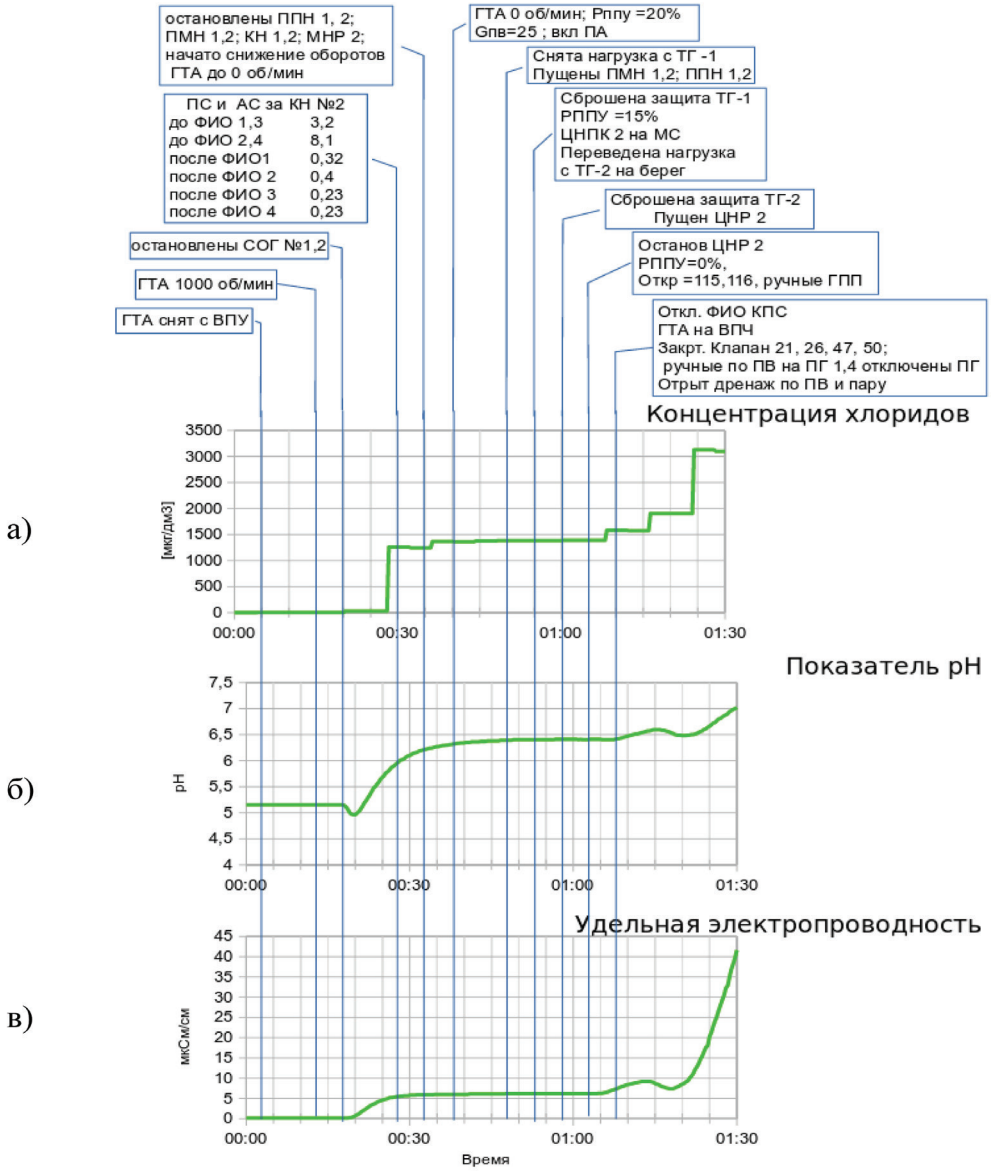

Рис. 3. Изменение измеряемых комплексом КАИССА значений показателей ионного состава в точке контроля «До ФИ-1, 3» при протечке охлаждающей воды в главный конденсатор:

а) концентрация хлорид ионов; *б*) pH; *в*) УЭП.

ППН — пусковой питательный насос; ПМН — пусковой масляный насос, МНР — масляный насос регулирования; ГТА — главный турбоагрегат, ТГ — турбогенератор; $P_{ппу}$ — тепловая мощность; ПС — предупредительная сигнализация; АС — аварийная сигнализация; КН — конденсатный насос; РППУ — рукоятка установки мощности ППУ; МС — малая скорость; ЦНПК — циркуляционный насос первого контура; СОГ — система охлаждения генератора; ЦНР — циркуляционный насос расхолаживания; ВПУ — валоповоротное устройство; ПВ — питательная вода; ПГ — парогенератор.

Значимое по отношению к среднеэксплуатационным значениям краткосрочное повышение удельной электрической проводимости, изменения pH, концентрации хлорид ионов, концентрации ионов натрия в точке контроля «До ФИ — 1, 3» было зафиксировано комплексом КАИССА за 12 часов до обнаружения потери герметичности ГК штатными средствами АК. Результаты измерений ионного состава технологической среды представлены на рис. 4.

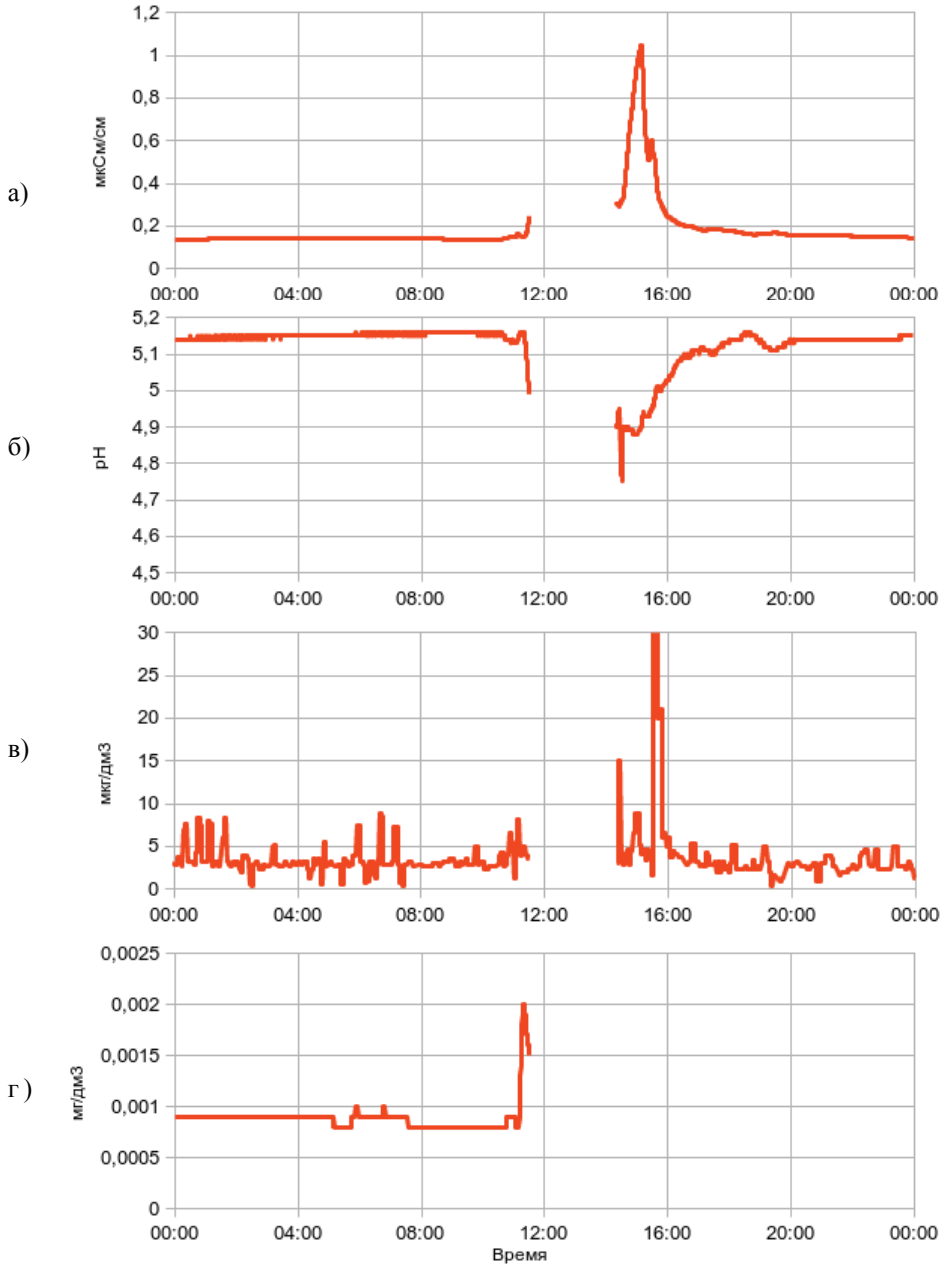

Рис. 4. Изменение содержания ионных примесей в точке контроля «До ФИ — 1,3» за сутки до обнаружения потери герметичности ГК (по данным, полученным комплексом КАИССА:

а) УЭП; *б*) pH; *в*) концентрация хлорид ионов; г) концентрации ионов натрия.

С учетом отрицательной корреляции измеренных значений показателя pH и концентрации хлорид-ионов в области, не превышающей 10^{-6} моль/дм^3, для технологической ситуации, представленной на рис. 4, одной из вероятных причин изменения состава среды ГК

могла являться подпитка конденсатора из цистерны запаса, имеющей открытый контакт с атмосферой, в рутинных режимах эксплуатации объекта.

В общем случае, при «нормальном» течении процессов формирования ионного состава сред КПТ при установленном выше среднеэксплуатационном уровне значений (около 10^{-7} моль/дм^3 для индивидуальных компонентов) раннее обнаружение потери их стационарности является задачей, решение которой требует применения статистических методов при оптимальной скважности текущих результатов измерений. Вплоть до реализации измерений в режиме on line с обоснованием периодичности их тактирования для представления оператору в обобщенном виде [3–7].

Результаты постоперативного анализа данных, полученных в эксплуатационных условиях стенда-прототипа

Состав работ по расширенному постоперативному анализу данных, полученных комплексом КАИССА при идентификации потери герметичности ГК, включал:

– разработку математической модели процесса массопереноса ионных примесей из охлаждающей воды в технологическую среду через неплотности конденсатора;

– статистическую обработку массивов экспериментальных данных с целью оценки возможности построения технологических алгоритмов ранней диагностики начала развития неплотности трубопроводов охлаждающей воды конденсатора до их разрушения по результатам АК в режиме on line.

На примере, описанном в монографии [12] для главного конденсатора К-12150, эксплуатируемого на АЭС с реакторами ВВЭР-440, была построена и адаптирована к условиям эксплуатации стендовой ЯЭУ модель массопереноса ионных примесей из охлаждающей воды в рабочую среду через неплотности ГК применительно к организации АК с использованием комплекса КАИССА. На рис. 5 проиллюстрированы результаты сравнения оценки расчетного значения выходного сигнала ИК по предложенной математической модели процесса протечки охлаждающей воды в ГК с экспериментальными результатами измерений УЭП, зафиксированными комплексом КАИССА. Термин «безразмерная концентрация» ($C^б$) означает расчетную оценку соотношения текущего (C_c) и среднеэксплуатационного значения C_c^0 (до начала развития неплотности ГК) контролируемого параметра в рабочей среде ГК. Например, при пересчете значения УЭП в единицы измерения «солесодержания», приведенные к массовой концентрации раствора хлорида натрия.

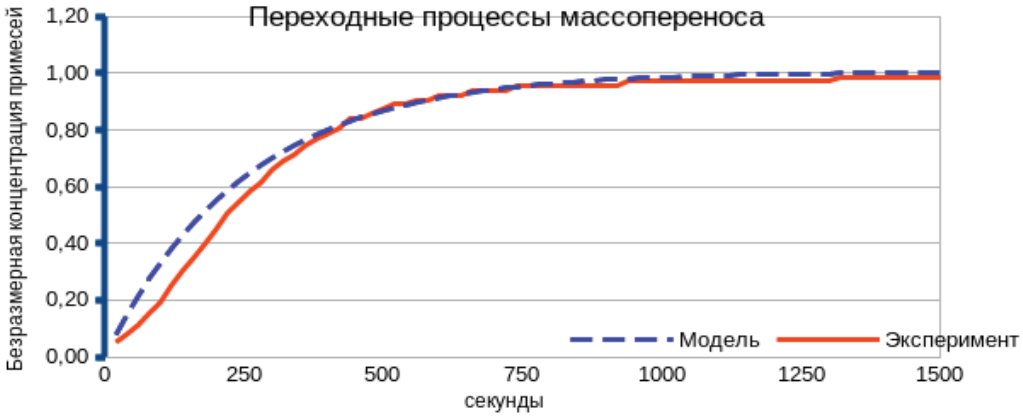

Рис. 5. Графики модельного и реального процесса массопереноса ионных примесей в среду главного конденсатора.

Хорошая согласованность расчетных и экспериментальных данных по оценке массопереноса ионных примесей из охлаждающей воды в рабочую среду через неплотности ГК:

– подтверждает корректность предложенной математической модели;

– позволяет оптимизировать соотношение периодичности дискретного опроса ИК и интервала усреднения результатов измерения (времени тактирования для дискретных измерительных каналов [6]) в режиме on line.

По результатам измерений УЭП технологической среды, зафиксированными при протечке ГК (рис. 3 и 5), можно сделать вывод, что процесс массопереноса ионных примесей из охлаждающей воды в рабочую среду описывается уравнениями 1 и 2 и характеризуется постоянной времени $T_п \approx 250$ с и временем затухания $T_з \approx 740$ с.

$$T_п \cdot \frac{dC_с^б}{dt} + C_с^б = K \cdot G_п^б, \tag{1}$$

где

$C_с^б = \frac{\Delta C_с}{C_с^0}$ — среднее значение безразмерной концентрации ионных примесей в рабочей среде после ГК, оцененное на интервале усреднения результатов измерения в режиме on line;

$G_п^б = \frac{\Delta G_п}{G_п^0}$ — среднее значение безразмерной величины расхода (присоса) охлаждающей воды в рабочую среду ГК.

Коэффициент передачи K между расходом присоса охлаждающей воды и концентрацией ионных примесей в технологической среде после главного конденсатора рассчитывается по соотношению (2):

$$K = \frac{(C_п^0 - C_с^0) \cdot G_п^0}{(G_р^0 + G_п^0) \cdot C_с^0}, \tag{2}$$

где $G_р^0$ номинальный расход технологической среды на входе в ГК.

Согласно терминологии, принятой в теории автоматического управления [13], постоянная времени характеризует инерционность объекта, описываемого обыкновенным дифференциальным уравнением первого порядка, и является мерой длительности переходного процесса выходного сигнала объекта. Время затухания процесса $T_з$ отвечает значению $3T_п$ при его выходе в стационарное состояние.

В соответствии с теоремой В. А. Котельникова [6], при установленном значении постоянной времени $T_п \approx 250$ секунд измерительные каналы, используемые для точного восстановления процесса массопереноса ионных примесей в ГК, должны обладать постоянной времени (временем тактирования при дискретизации результатов измерений ИК on line на оптимизированном интервале усреднения) $T_{ик} \leq 125$ секунд.

Для комплекса КАИССА постоянная времени непрерывного измерительного канала УЭП составляла $T_{икУЭП} \approx 64$ с. Время тактирования измерительного канала хлорид-ионов $T_{икCl-}$ задается программно в диапазоне от 60 до 600 секунд с шагом 60 секунд. При проведении исследований с расширенным анализом экспериментальных данных измерительного контроля характера ВФХП при потере герметичности ГК, время тактирования измерительного канала хлорид ионов $T_{икCl}$ задано равным 240 секунд.

В качестве параметров, позволяющих оценить возможность ранней идентификации и прогноза развития процесса массопереноса ионных примесей при потере плотности ГК, при углубленном ретроспективном анализе характера поведения показателей ионного состава рабочей среды ГК по экспериментальным данным, полученным комплексом КАИССА, были выбраны:

– отклонение текущего скользящего среднего значения показателей ионного состава среды «До ФИ-1, 3» от среднеэксплуатационного значения (на 6-минутном интервале усреднения);

– отклонение текущего значения автоковариационной функции (АКФ) от среднеэксплуатационного (на 240-минутном интервале расчета).

Результаты статистических оценок скользящего среднего значения показателей ионного состава среды «До ФИ-1, 3», зарегистрированных комплексом КАИССА за двое суток до обнаружения негерметичности ГК, в сравнении с экспериментальными данными для среднеэксплуатационного состояния объекта приведены в табл. 2. С оцененной достоверностью 99 % показано значимое отклонение характеристик ВФХП, формирующих ионный состав рабочей среды в ГК, от стационарного состояния в области значений нормируемых показателей, существенно более низкой по сравнению с:

– нормированными пределами безопасной эксплуатации объекта;

– метрологическими характеристиками штатных средств АК по нижней границе диапазона и точности используемых методов и средств измерения.

Таблица 2

Статистические характеристики результатов АК нормируемых показателей ионного состава среды КПС в точке контроля «До ФИ-1, 3» с использованием комплекса КАИССА.

ИК хлорид-ионов мкг/дм^3					
Среднеэксплуатационное состояние			Состояние за 2-е суток до регистрации инцидента		
C^{Cl-}	Дов. интервал 99 %		${}^{Ин}C^{Cl-}$	Дов. интервал 99 %	
	C^{Cl-}_{min}	C^{Cl-}_{max}		${}^{Ин}C^{Cl-}_{min}$	${}^{Ин}C^{Cl-}_{max}$
1.3	1.2	1.4	3.5	3.2	3.9
ИК УЭП мкСм/см					
Среднеэксплуатационное состояние			Состояние за 2-е суток до регистрации инцидента		
Значение УЭП	Дов. интервал 99 %		Значение УЭП	Дов. интервал 99 %	
	$УЭП_{min}$	$УЭП_{max}$		${}^{Ин}УЭП_{min}$	${}^{Ин}УЭП_{max}$
0.099	0.087	0.110	0.144	0.139	0.151

Одновременный выход значений статистических характеристик временных рядов УЭП и концентрации хлоридов за 99 % границы доверительных интервалов, характеризующих их среднеэксплуатционное поведение, показывает, что:

– по крайней мере, уже за двое суток до регистрации инцидента штатными средствами интенсивность процесса поступления ионных примесей в рабочую среду ГК значимо увеличилась по сравнению со среднеэксплуатационным характером ВФХП, формирующих ее ионный состав;

– в качестве наиболее вероятной причины изменения характера формирования ионного состава среды ГК следует рассматривать потерю герметичности трубопроводов подачи высокоминерализованной охлаждающей среды.

Для дополнительной иллюстрации выводов на основании данных, представленных

в табл. 2, на рис. 6 и 7 графически представлен характер изменения амплитуды и частоты измеряемых комплексом КАИССА значений концентрации хлорид-ионов и УЭП за тот же период наблюдений.

а)

б)

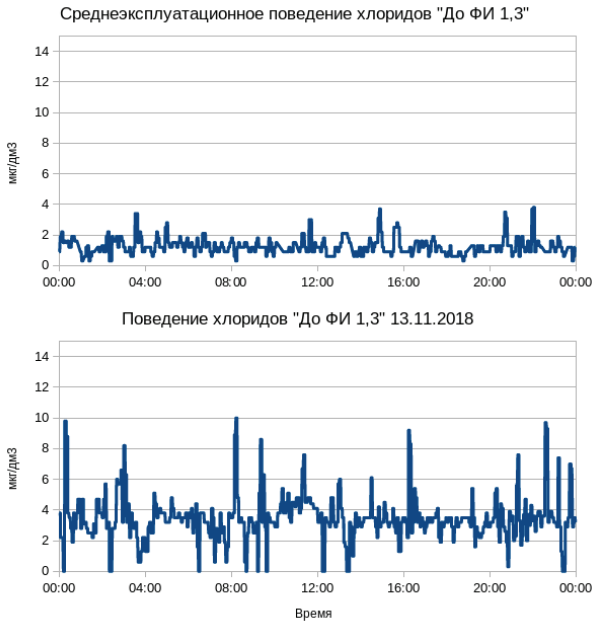

Рис. 6. Поведение массивов измеряемых комплексом КАИССА значений концентрации хлорид-ионов:

а) среднеэксплуатационное поведение концентрации хлорид-ионов; *б*) поведение концентрации хлорид-ионов за 2-е суток до регистрации протечки (по данным комплекса КАИССА для точки контроля «До ФИ-1, 3»).

а)

б)

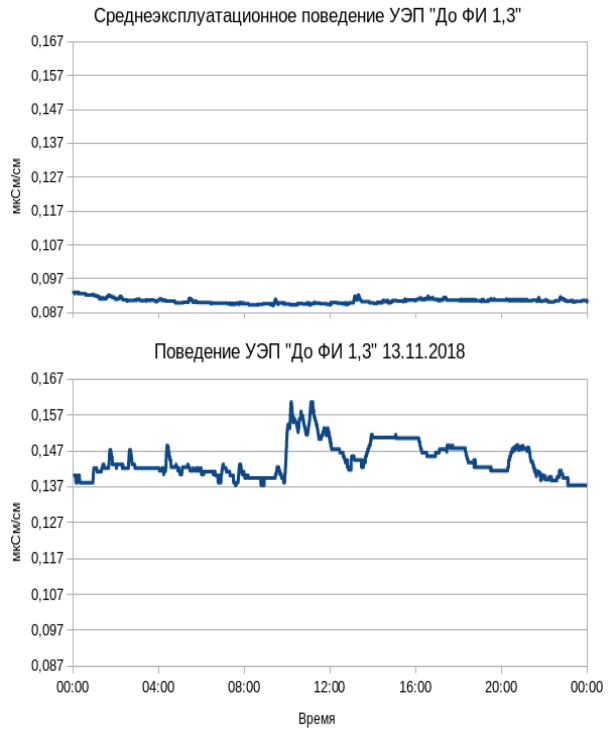

Рис. 7. Поведение УЭП по данным комплекса КАИССА в точке контроля«До ФИ-1, 3»:

а) среднеэксплуатационное поведение УЭП; *б*) поведение УЭП за 2-е суток до регистрации протечки.

Наблюдаемое значимое изменение амплитудно-частотных характеристик процессов массопереноса ионных примесей в ГК подтверждается также значимым различием характера АКФ (3) [14]) для рядов измерений хлорид-ионов и УЭП, полученных в нормальных режимах эксплуатации объекта и за 2-е суток до идентификации протечки штатными средствами аналитического контроля (рис. 8). При этом априорно предполагается, что для исправного ГК амплитудно-частотная характеристика процесса формирования ионного состава рабочей среды является постоянной величиной.

$$KK_{\text{ав}}(t) = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^{N-t} (x_i - \bar{x})(x_{i+t} - \bar{x}) \qquad (3)$$

где $KK_{\text{ав}}(t)$ — значение автоковариационной функции временного ряда на заданном интервале времени t = 240 минут, N — объём временного ряда, $\bar{x}$ — среднее значение n результатов измерений.

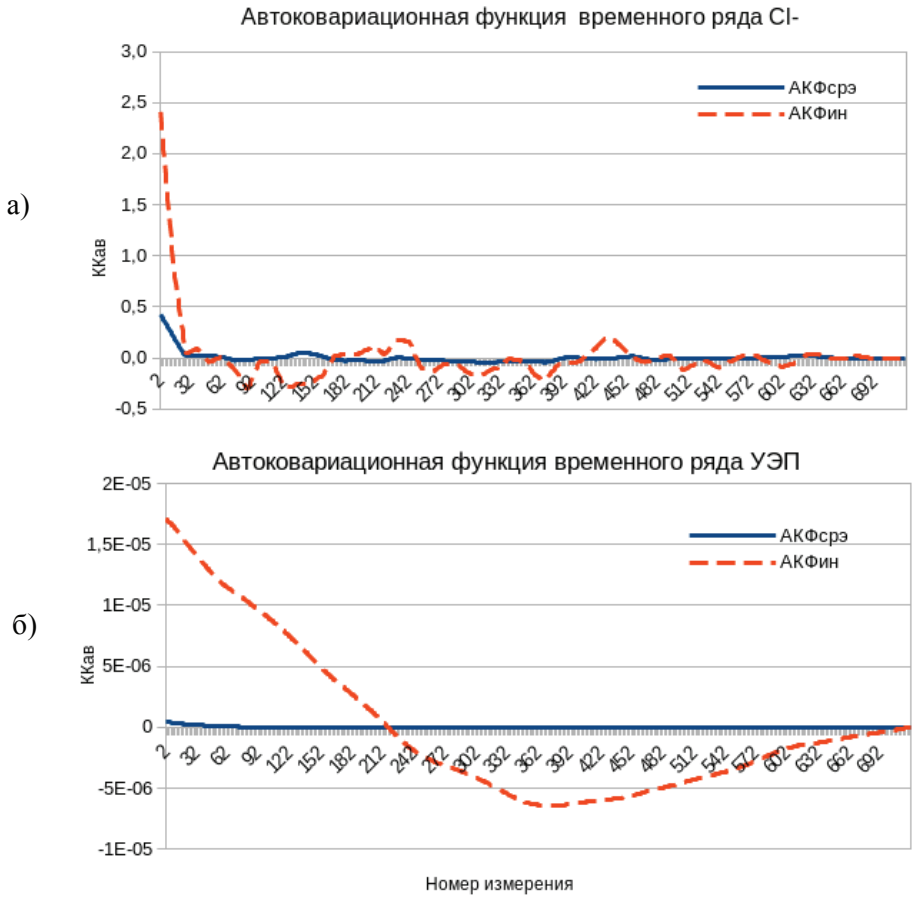

Рис. 8. Автоковариационные функции временных рядов результатов измерения концентрации хлорид-ионов и УЭП в точке контроля «До ФИ-1, 3»:

а) концентрации хлорид-ионов; б) удельной электрической проводимости.

Сопоставление статистических характеристик рядов экспериментальных результатов измерения комплексом КАИССА физически взаимосвязанных параметров, характеризующих процесс массопереноса охлаждающей воды в объем ГК, однозначно указывает на значимое повышение надежности вывода о действительном увеличении интенсивности поступления ионных примесей в рабочую среду на ранней стадии развития неплотности ГК при организации АК с обеспечением эффективного информационного резервирования [15].

Выводы

Полученные при натурных испытаниях комплекса КАИССА экспериментальные данные показывают принципиальную возможность построения расчетной модели описания «течи перед разрывом» по данным аналитического контроля связанных интегральных и индивидуальных показателей ионного состава среды конденсатора с использованием измерительных и измерительно-вычислительных компонентов измерительных каналов, обеспечивающих необходимые метрологические характеристики и обработку текущих результатов аналитического контроля в режиме on line. Построение алгоритмов ранней диагностики начала развития неплотности трубопроводов охлаждающей воды конденсатора до их грубого разрушения является важной технологической задачей оптимального управления объектом. В том числе с реализацией программных модулей информационной поддержки персонала в режиме «совета оператору» [16].

Разработка и опытно-промышленная эксплуатация комплекса КАИССА позволили впервые в условиях эксплуатации полномасштабной стендовой ЯЭУ получить:

– состоятельные и эффективные статистические оценки действительного среднеэксплуатационного уровня значений интегральных и индивидуальных показателей ионного состава водных сред конденсатно-питательной системы в различных режимах эксплуатации объекта;

– расширенный объем экспериментальной информации о характере внутриконтурных физико-химических процессов, формирующих ионный состав водных сред конденсатно-питательной системы объекта, на основе «процессного подхода», общей теории систем автоматического управления и методологии информационного резервирования измерительно-вычислительных систем;

– исходные данные для дальнейшего развития функциональных возможностей систем аналитического контроля применительно к задачам ранней идентификации отклонений оборудования конденсатно-питательной системы от базового состояния, включая: оперативный контроль исчерпания динамической обменной емкости фильтров конденсатоочистки, определение сепарационных характеристик парогенератора без ввода в его объем соли-индикатора [17], исправность оборудования контуров возвратного конденсата, подготовку воды первичного заполнения и подпиточной воды .

Заключение

Накопленный опыт эксплуатации комплекса КАИССА позволяет сформулировать концепцию и исходные технические требования к объему функций, видам обеспечения, техническим и эксплуатационным характеристикам измерительных, измерительно-вычислительных и вспомогательных компонентов унифицированных комплексов оперативного автоматизированного аналитического контроля ионного состава водных сред и диагностики состояния оборудования конденсатно-питательной системы транспортных ЯЭУ и других объектов атомной и тепловой энергетики.

Литература

1. *Вилков Н. Я.* Оценка текущего состояния технологического объекта управления по данным химического анализа / Н. Я. Вилков, Ю. В. Крюков // Аналитика и контроль. 2001. Т. 5, № 3. С. 265–274.

2. *Блинов С. В.* Организация управления динамической системой «технологические

рабочие среды-конструкционные материалы» на объектах атомной энергетики / С. В. Блинов, Н. Я. Вилков, Ю. В. Крюков // Проблемы и перспективы развития химического и радиохимического контроля в атомной энергетике (Атомэнергоаналитика-2014): сб. докладов 7-го научно-технического совещания. 16–18 сентября 2014 г. Сосновый Бор, 2014. С. 413–415.

3. *Балакирев В. С.* Оптимальное управление процессами химической технологии / В. С. Балакирев, В. М. Володин, А. М. Цирлин. М.: Химия, 1978.
4. *Химмельблау Д.* Обнаружение и диагностика неполадок в химических и нефтехимических процессах. Л.: Химия, 1983.
5. РМГ 64-2003. ГСИ. Обеспечение эффективности измерений при управлении технологическими процессами. Методы и способы повышения точности измерений.
6. *Быков Ю. М.* Основы обработки информации в АСУ химических производств. Л.: Химия, 1986.
7. *Вилков Н. Я.* Формирование требований к метрологическим характеристикам измерительных каналов систем химического контроля АЭС на основе статистического анализа качества контролируемых процессов / Н. Я. Вилков, Ю. В. Крюков, В. Ф. Киреев // Экология и атомная энергетика. 2000. Вып. 2. С. 83–89.
8. Создание и ввод в опытно-промышленную эксплуатацию автоматизированного комплекса оперативного и исследовательского химического контроля ионного состава водных сред второго контура стендовой ЯЭУ (КАИССА КВ-1) / Н. Я. Вилков, С. В. Блинов, М. И. Козин, А. А. Змитродан, И. Н. Заколодный, А. А. Петухов [и др.] // Годовой отчет ФГУП «НИТИ им. А. П. Александрова» за 2016 год. Сосновый Бор: ФГУП «НИТИ им. А. П. Александрова», 2017. С. 150–156.
9. Патент РФ № 2368894 (приоритет от 02 июня 2008 г.) Способ калибровки иономеров и устройство для его реализации / Н. Я. Вилков, В. Н. Матвеев, Н. М. Сорокин.
10. *Коренман И. М.* Аналитическая химия малых концентраций. М: Химия, 1967.
11. *Бейтс Р.* Определение pH. Теория и практика. Л: Химия, 1968.
12. *Маргулова Т. Х.* Атомные электрические станции. М.: Высшая школа, 1978.
13. *Бесекерский В. А.* Теория систем автоматического управления / В. А. Бесекерский, Е. П. Попов. Изд. 4-е, перераб. и доп. СПб.: Изд-во «Профессия», 2003. 752 с.
14. *Дженкинс Г. М.* Спектральный анализ и его приложения. Вып. 1 / Г. М. Дженкинс, Д. Г. Ваттс. М.: Мир, 1971.
15. Р-50-54-82-88. Надежность в технике. Выбор способов и методов резервирования.
16. *Солдатенков Д. М.* Развитие программно-технического комплекса «Советчик оператора» для реакторной установки стенда КВ-1 / Д. М. Солдатенков, Е. В. Коршунова // Годовой отчет ФГУП «НИТИ им. А. П. Александрова» за 2016 г. Сосновый Бор: ФГУП «НИТИ им. А. П. Александрова», 2017. С. 59–63.
17. Определение сепарационных характеристик парогенератора без ввода в его объем соли-индикатора с использованием автоматических анализаторов высокой чувствительности / Ю. Ф. Кутдюсов [и др.] // Ввод АЭС в эксплуатацию: сборник тезисов докладов 2-й Международной научно-технической конференции. ОАО «Атомтехэнерго», 23–24 апреля 2012 г., Россия, Москва. С. 43.