

УДК 621.039

*В.И. Скалозубов, В.М. Спинов,  
А.В. Лужанская, И.А. Климчук, Т.В. Габлая*

## УПРАВЛЕНИЕ АВАРИЯМИ С ПОЛНОЙ ПОТЕРЕЙ ДЛИТЕЛЬНОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ НА ЯДЕРНЫХ ЭНЕРГОУСТАНОВКАХ НАСОСАМИ С ПАРОПРИВОДОМ

**Ключевые слова:** управление авариями с полной потерей длительного электроснабжения, ядерные энергоустановки.

### Введение

В 2011 году отправной точкой тяжелой аварии с повреждением ядерного топлива, с разрушительными парогазовыми взрывами с катастрофическими экологическими последствиями на АЭС Фукусима-Дайичи, затоплением цунами промплощадки 1...4 энергоблоков [1] была полная потеря длительного электроснабжения (ППДЭ) ядерных энергоустановок (ЯЭУ).

Промплощадка АЭС Фукусима-Дайичи расположена на высоте около десяти метров над уровнем моря. Кроме того, была предусмотрена система волнорезов высотой более четырех метров над уровнем моря. Максимальная высота цунами в соответствии с проектными техническими обоснованиями безопасности АЭС Фукусима-Дайичи не должна была превышать пяти метров. Однако запроектное землетрясение с магнитудой около девяти баллов в эпицентре на расстоянии 160–180 км от побережья вызвало цунами высотой более 14 метров, что и привело к затоплению промплощадки АЭС Фукусима-Дайичи. В результате были затоплены аварийные дизель-генераторы, обеспечивающие работоспособность активных систем безопасности с электронасосами для отвода остаточных тепловыделений в активной зоне ядерных реакторов. Отказ электронасосов активных систем безопасности привел к исходному аварийному событию с ППДЭ с последовавшим нарушением функции безопасности по охлаждению активной зоны ядерных реакторов, что в конечном итоге привело к увеличению температуры ядерного топлива свыше предельно допустимых значений; повреждению/разрушению тепловыделяющих элементов (ТВЭЛ) ядерных реакторов; образованию в результате пароциркониевой реакции сверхкритических концентраций взрывоопасного водорода; взрывам; и сверхкритическим радиоактивным выбросам в окружающую среду.

Управление тяжелыми авариями с повреждением ядерного топлива альтернативными способами (подача охлаждения пожарными машинами, вертолетами и т.п.) оказалось неэффективным, так как в конечном итоге не удалось предотвратить разрушительные парогазовые взрывы, сверхнормативные радиоактивные выбросы и катастрофические экологические последствия.

В технических отчетах по анализу безопасности украинских ЯЭУ исходные события с ППДЭ ранее рассматривались как априори ведущие к однозначному возникновению тяжелых аварий с повреждением ядерного топлива. Однако при этом полагалось, что вероятность возникновения аварий с ППДЭ крайне мала. Поэтому противоаварийные мероприятия и технические средства по управлению авариями с ППДЭ фактически не разрабатывались. Уроки Фукусимской аварии в 2011 году определили недопустимость такого подхода к относительно маловероятным исходным аварийным событиям (в том числе и с ППДЭ).

После Фукусимской аварии все мировое ядерное сообщество под эгидой МАГАТЭ и Национальных органов регулирования ядерной безопасности пришло к однозначному заключению о необходимости разработки противоаварийных мероприятий и технических средств для повышения эффективности управления авариями с ППДЭ на ЯЭУ.

Одним из таких решений этой проблемы является создание новых эффективных пассивных систем безопасности (без использования насосов с электроприводами) для управления авариями с ППДЭ на ЯЭУ. Данная работа посвящена одному из возможных путей реализации этого решения, основанному на использовании аварийных питательных насосов с паропроводом (АПНПП) для эффективного управления авариями с ППДЭ.

### 1. Анализ литературных данных и постановка задач исследования

Один из современных подходов решения проблемы повышения эффективности управления авариями с ППДЭ на ЯЭУ связан с разработкой и внедрением системы пассивного отвода тепла через парогенератор ЯЭУ (СПОТ ПГ). Функционирование системы основано на принципе естественной циркуляции. СПОТ ПГ представляет собой замкнутый циркуляционный контур, состоящий из трубопровода отвода пара из парогенератора (ПГ); теплообменника конденсации пара; и опускного трубопровода конденсата в ПГ. Основанием СПОТ ПГ является успешное внедрение систем пассивного отвода из гермообъема ЯЭУ (СПОТ ГО), которые осуществляют регулирование давления и температуры воздуха в гермообъеме ЯЭУ [2–4].

Анализ эффективности СПОТ ПГ определил следующие основные ограничения/недостатки такого подхода.

1. Для обеспечения адекватности одной СПОТ ПГ аварийному питательному электронасосу (АПЭН) и выполнения функций безопасности отвода тепла (ФБ ОТ) от активной зоны реактора и поддержания необходимого уровня питательной воды в ПГ площадь поверхности теплообменников должна составлять не менее  $35000 \text{ м}^2$ , а высота СПОТ ПГ — около нескольких сотен метров.

2. Расположение теплообменников конденсации пара СПОТ ПГ на большой высоте за пределами защитной оболочки гермообъема ЯЭУ существенно снижает общий уровень безопасности в отношении внешних экстремальных воздействий (землетрясения, торнадо, ураганы, падение крупных объектов и т.п.).

Поэтому необходимо обоснование квалификации СПОТ ПГ для управления авариями с ППДЭ с компоновкой внутри защитной оболочки гермообъема ЯЭУ.

Более эффективный подход к управлению авариями с ППДЭ, предложенный в разработках профессора А.В. Королева [5, 6], основан на применении аварийного питательного насоса с паропроводом. Функционирование системы АПНПП базируется на принципе отбора пара из ПГ на паропровод, что обеспечивает работоспособность АПНПП (рис. 1: 1 — реактор; 2 — парогенератор; 3 — главный циркуляционный насос; 4 — быстрозапорный обратный клапан турбины; 5 — питательный насос с паропроводом; 6 — гидроемкость; 7 — деаэрактор; 8 — клапаны). Система АПНПП располагается как дублирующая система АПЭН и имеет общий с ней бак охлаждающей питательной воды.

Основные преимущества внедрения системы АПНПП для управления авариями с ППДЭ определяются следующими положениями: АПНПП обеспечивает адекватное дублирование проектной системы АПЭН по обеспечению функций безопасности отвода тепла и парогенератора в течение более 72 часов аварийного процесса; располагается на поверхности промплощадки атомных энергоблоков в изолированных закрытых помещениях, что обеспечивает необходимый уровень безопасности в отношении внешних экстремальных воздействий.

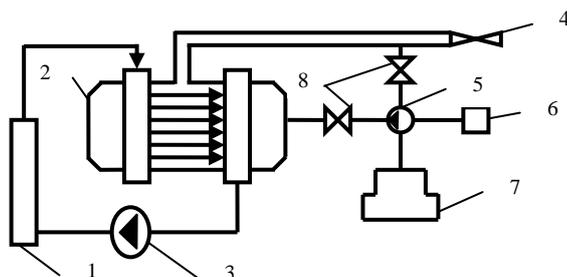


Рис. 1

Однако внедрение системы АПНПП для управления авариями с ППДЭ определяет необходимость ее квалификации на работоспособность и надежность функционирования.

В соответствии с терминологией МАГАТЭ под квалификацией подразумевается расчетное, экспериментальное или расчетно-экспериментальное обоснование работоспособности и надежности систем/оборудования в рабочих и аварийных режимах. В данном случае квалификация системы АПНПП сводится к определению минимального допустимого давления пара в паропроводе, обеспечивающего работоспособность АПНПП; а также предотвращению доминантных факторов, определяющих надежность функционирования АПНПП.

Опыт эксплуатации насосного оборудования ЯЭУ показывает, что доминантным фактором, влияющим на его надежность, являются гидродинамические удары (ГУ), которые сопровождаются импульсным высокоамплитудным увеличением давления, резким торможением потока и мощным гидродинамическим воздействием на все элементы системы [7–10]. Решение указанных выше вопросов и определяет актуальность, цели и задачи данной работы.

## 2. Цель и задачи исследования

Основная цель представляемой работы — проведение квалификации на работоспособность и надежность АПНПП для управления авариями на ЯЭУ с ППДЭ — определяет необходимость решения следующих задач:

- разработка методов квалификации АПНПП на работоспособность и надежность управления авариями с ППДЭ;
- анализ результатов квалификации и обоснование практических рекомендаций.

## 3. Основные положения методов квалификации АПНПП

**3.1. Метод квалификации надежности АПНПП для управления авариями с ППДЭ.** Опыт эксплуатации тепловых и ядерных энергоустановок показал, что доминантным фактором, влияющим на надежность систем теплотехнического оборудования, являются отказы при пуске насосов вследствие гидродинамических ударов, сопровождающихся импульсным высокоамплитудным ростом давления и мощным гидродинамическим воздействием, что может привести к отказам/разрушениям/снижению ресурса эксплуатации. Поэтому квалификацию надежности при пуске АПНПП целесообразно проводить для определения причин, условий и последствий ГУ.

Основные положения допущения метода квалификации на условия ГУ при пуске АПНПП.

- Основной причиной возникновения ГУ при пуске АПНПП является инерционность напорно-расходной характеристики (НРХ) насоса  $\Delta P_p$  (т.е. зависимость развиваемого напора давления насоса от расхода в системе) [7, 8]. Под инерционностью НРХ подразумевается «запаздывание» во времени реакции изменения  $\Delta P_p$

на изменения расхода в системе. В отличие от насосов с электроприводом, в которых развиваемый напор давления насоса зависит от расхода в системе, напорная характеристика АПНПП определяется также давлением пара в парогенераторе. Эти различия и определяют особенности условий возникновения ГУ в системе АПНПП.

- Необходимым условием возникновения ГУ при пуске АПНПП является резкое торможение потока вследствие аperiodической неустойчивости, вызванной инерционностью НРХ. При этом кинетическая энергия торможения потока переходит в энергию импульса давления ГУ.

- Процессы в системе АПНПП полагаются изотерическими.

Уравнения движения и сохранения энергии питательной воды при пуске АПНПП:

$$\frac{L}{\Pi} \cdot \frac{dG}{dt} = \Delta P_p(t) - \Delta P_{VG} - \frac{\xi}{\rho \Pi^2} \cdot G^2, \quad (1)$$

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{G^2}{2\rho \Pi^2} + i \right) = 0, \quad (2)$$

$$G(t=0) = 0; \quad i(t=0) = i_0, \quad (3)$$

где  $G$  — массовый расход;  $t$  — время;  $L$ ,  $\Pi$  — длина и площадь проходного сечения трубопровода системы АПНПП;  $\Delta P_{VG} = P_V - P_G$  — перепады давления в парогенераторе и гидроемкостях запаса питательной воды;  $\xi$  — коэффициент суммарного гидравлического сопротивления системы;  $\rho$  — плотность питательной воды;  $i$  — удельная (на единицу массы) энтальпия питательной воды.

Развиваемый АПНПП напор давления

$$\Delta P_p(t) = \int_0^t \frac{dG}{d\tau} \cdot I_p(P_v, \tau) \cdot d\tau, \quad (4)$$

где параметр чувствительности НРХ

$$I_p = \frac{\partial \Delta P_p}{\partial G} + \frac{\partial P_v}{\partial G}. \quad (5)$$

Напорная характеристика АПНПП может быть определена на основе эксплуатационных испытаний и/или данных опыта эксплуатации аналогичных насосов с паропроводом (например, турбопитательный насос парогенератора) и/или экспериментов на установках, соответствующих критериям гидродинамического подобия [11].

В установленном (рабочем) режиме АПНПП с расходом  $G_0$  необходимый напор давления

$$\Delta P_{p_0} = \Delta P_{VG} + \frac{\xi}{\rho \Pi^2} \cdot G_0^2. \quad (6)$$

Условие возникновения ГУ при пуске АПНПП

$$\Delta P_p(t) > \Delta P_{p_0}. \quad (7)$$

При условии (7) система с АПНПП находится в неравновесном неустойчивом состоянии. Это приводит к импульсному торможению потока (aperiodическая гидродинамическая неустойчивость). Максимальная амплитуда импульса давле-

ния ГУ определяется условиями перехода кинетической энергии торможения потока в энергию импульса давления ГУ  $\Delta P_A$ .

Из уравнения (2) вытекает следующее:

$$\Delta P_A = \left( \frac{di}{dP} \right)^{-1} \cdot \frac{G^2(t_0) - G_0^2}{2\rho\Pi^2}, \quad (8)$$

где  $t_0$  — время пуска АПНПП.

В общем случае амплитуды ГУ могут быть решены численным методом Рунге–Кутты уравнений (1)–(5) при определенных значениях  $I_p$  и  $t_0$ .

**3.2. Метод квалификации работоспособности АПНПП для управления авариями с ППДЭ.** Данная квалификация работоспособности АПНПП сводится к определению минимального давления в парогенераторе ( $P_{\min}$ ), при котором обеспечивается устойчивое функционирование АПНПП, а также времени пуска насоса до начала рабочего режима ( $t_g$ ).

Минимальное давление пара в паропроводе, обеспечивающее работоспособность АПНПП, может быть определено по эксплуатационным данным основного турбопитательного насоса (ТПН) ЯЭУ, который, как и АПНПП, работает от паропровода с тем отличием, что пар поступает в паропровод от отборов турбины. НРХ и область работоспособности ТПН представлены соответственно на рис. 2, а, б.

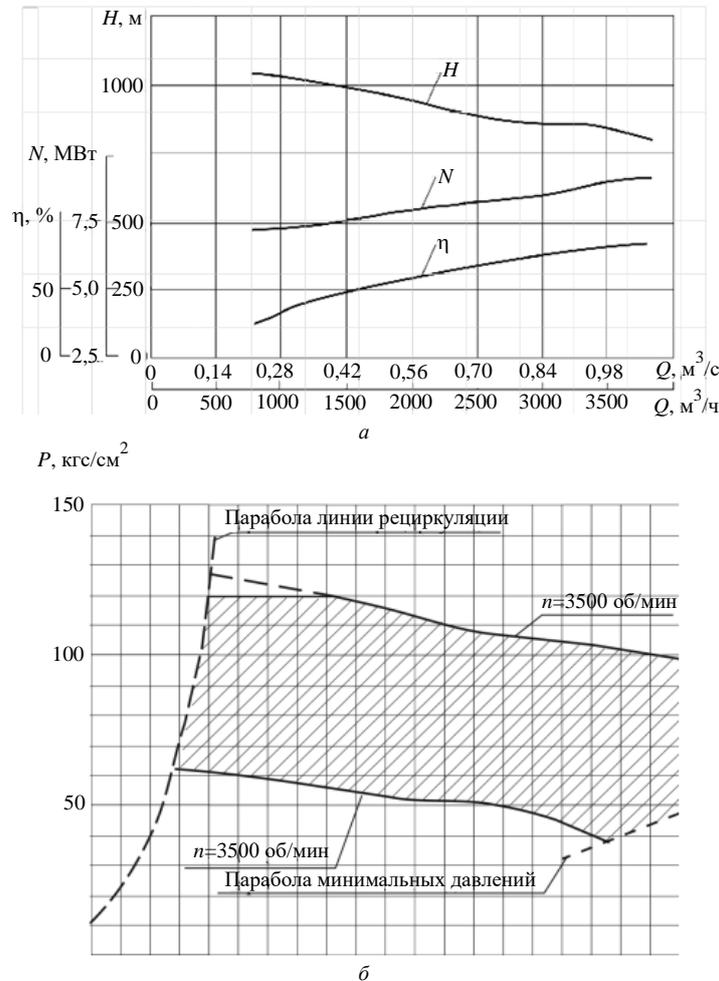


Рис. 2

Учитывая линейную зависимость расхода питательной воды от давления пара в паропроводе, получим

$$P_{\min}(\text{АПНПП}) = P_{\min}(\text{ТПН}) \frac{G_0(\text{АПНПП})}{G_0(\text{ТПН})}, \quad (9)$$

где  $P_{\min}(\text{ТПН})$  — минимальное давление пара, обеспечивающее работоспособность ТПН;  $G_0(\text{АПНПП})$ ,  $G_0(\text{ТПН})$  — установившиеся (рабочие) расходы питательной воды в АПНПП и ТПН соответственно.

Время пуска до начала выхода АПНПП в рабочий режим ( $t_g$ ) можно оценить на основе известных экспериментов [5, 6] на модели АПНПП. Полагая, что  $t_g$  пропорционально рабочему (установившемуся) расходу питательной воды, получим следующее:

$$t_g(\text{АПНПП}) = t_g(E) \cdot \frac{G_0(\text{АПНПП})}{G_0(E)}, \quad (10)$$

где  $t_g(E)$ ,  $G_0(E)$  — экспериментальные данные.

#### 4. Основные положения методов квалификации АПНПП

Основные результаты квалификации надежности АПНПП для управления авариями с ППДЭ заключаются в следующем.

- Максимальные амплитуды давления ГУ не превышают 0,2 МПа. Расчеты проводились путем численного интегрирования системы уравнений (1)–(5) при запуске АПНПП  $t_0 \leq 10$  с (по соответствующим экспериментальным данным [5, 6] и параметрам чувствительности НРХ (по эксплуатационным данным ТПН)):

$$\frac{\partial \Delta P_p}{\partial G} = -1,6 \cdot 10^{-2} \text{ МПа} \cdot \text{ час/м}^3,$$

$$\frac{\partial P_v}{\partial G} = -2,4 \cdot 10^{-3} \text{ МПа} \cdot \text{ час/м}^3.$$

Установившийся (рабочий) расход АПНПП в расчетах адекватен рабочему расходу АПЭН —  $150 \text{ м}^3/\text{ч}$ .

- Снижение максимальных амплитуд давления ГУ возможно за счет уменьшения времени пуска АПНПП и влияния параметров чувствительности НРХ. Эти практические рекомендации следует учитывать при проектировании АПНПП.

- Проведение дополнительной экспериментальной квалификации надежности АПНПП для определения влияния максимальных амплитуд давления ГУ на возможные отказы и нарушения целостности конструкций системы АПНПП.

Основные результаты квалификации работоспособности АПНПП для управления авариями с ППДЭ заключаются в следующем.

- Минимальное давление пара в паропроводе, позволяющее поддерживать работоспособность АПНПП, составляет 0,18 МПа при минимальном давлении пара 3,6 МПа (рис. 2), обеспечивающем работоспособность турбопитательного насоса, и рабочих расходах  $3000$  и  $150 \text{ м}^3/\text{ч}$  соответственно для ТПН и АПНПП.

Полученное расчетное значение согласуется с известными экспериментальными данными [5, 6, 12].

- В экспериментах [5, 6] на модели АПНПП максимальное время выхода после начала пуска насоса на рабочий (установившийся) режим с расходом питательной воды  $1 \text{ м}^3/\text{ч}$  составляло не более пяти секунд. Тогда из уравнения (10) следует, что для промышленного АПНПП с рабочим расходом  $150 \text{ м}^3/\text{ч}$  время выхода на рабочий режим составляет не менее 750 с. В течение 750 с от останова ре-

актора относительная мощность остаточных тепловыделений является значительной и составляет от 100 до 70 %. Поэтому необходимо обоснование альтернативных технических решений обеспечения функции безопасности по отводу тепла от реактора в начальный момент аварии с ППДЭ до момента выхода АПНПП на рабочий (установившийся) режим.

- Необходима дополнительная экспериментальная квалификация работоспособности АПНПП на экспериментальных установках, соответствующих критериям гидродинамического подобия натурным объектам [11].

### Заключение

Авария с полной потерей длительного электроснабжения, вызванная затоплением в результате цунами, была основной причиной повреждения ядерного топлива, разрушительных парогазовых взрывов и катастрофических экологических последствий на АЭС Фукусима-Дайичи в 2011 году.

После Фукусимской аварии все мировое ядерное сообщество под эгидой МАГАТЭ и Национальных органов регулирования ядерной безопасности пришло к однозначному заключению о необходимости совершенствования противоаварийных мероприятий и технических средств для повышения эффективности управления авариями на ядерных энергоустановках при полной потере длительного электроснабжения.

Одним из таких подходов к решению указанной проблемы является разработка и внедрение аварийного питательного насоса с паропроводом от парогенератора ядерной энергоустановки, не требующего электроснабжения и обеспечивающего адекватное дублирование проектной системы аварийного питательного электронасоса.

Разработаны методы квалификации на надежность и работоспособность аварийного питательного насоса с паропроводом для управления авариями с полной потерей длительного электроснабжения на ядерных энергоустановках.

Определяющими факторами квалификации надежности аварийного питательного насоса с паропроводом являются причины, условия и последствия гидродинамических ударов, которые сопровождаются импульсным высокоамплитудным ростом давления и резким торможением потока.

Определяющим фактором квалификации работоспособности аварийного питательного насоса с паропроводом является минимально допустимое давление в парогенераторе.

В результате расчетной квалификации надежности аварийного питательного насоса с паропроводом для управления авариями с полной потерей длительного электроснабжения установлено, что максимальные амплитуды давления гидроударов не превышают 0,2 МПа. Снижение максимальных амплитуд давления гидроударов возможно за счет уменьшения времени пуска аварийного питательного насоса с паропроводом и влияния параметров чувствительности напорно-расходной характеристики насоса.

При расчетно-экспериментальной квалификации работоспособности аварийного питательного насоса с паропроводом для управления авариями с полной потерей длительного электроснабжения установлено, что минимально допустимое давление пара в парогенераторе составляет 0,18 МПа; а время выхода на рабочий (установившийся) режим — не менее 750 с. В этом интервале времени относительная мощность остаточных тепловыделений является значительной и составляет не более 70 %. Поэтому необходимо обоснование альтернативных технических решений эффективного управления авариями с полной потерей длительного электроснабжения на начальном этапе до выхода насоса с паропроводом на рабочий (установившийся) режим.

*В.І. Скалозубов, В.М. Спінов,  
Г.В. Лужанська, І.О. Климчук, Т.В. Габляя*

## КЕРУВАННЯ АВАРІЯМИ З ПОВНОЮ ВТРАТОЮ ТРИВАЛОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ НА ЯДЕРНИХ ЕНЕРГОУСТАНОВКАХ НАСОСАМИ З ПАРОПРИВОДОМ

Аварія з повною втратою тривалого електропостачання, викликана затопленням цунамі, була основною причиною пошкодження ядерного палива, руйнівних парогазових вибухів і катастрофічних екологічних наслідків на АЕС Фукусіма-Дайїчі в 2011 році. Після Фукусімської аварії все світове ядерне співтовариство під егідою МАГАТЕ і Національних органів регулювання ядерної безпеки прийшло до однозначного висновку щодо необхідності вдосконалення протиаварійних заходів та технічних засобів для підвищення ефективності керування аваріями на ядерних енергоустановах при повній втраті тривалого електропостачання. Одним із таких підходів вирішення зазначеної проблеми є розробка і впровадження аварійного живильного насоса з пароприводом від парогенератора ядерної енергоустановки, що не потребує електропостачання та забезпечує адекватне дублювання проектною системою аварійного живильного електронасоса. Розроблено методи кваліфікації на надійність і працездатність аварійного живильного насоса з пароприводом для керування аваріями з повною втратою тривалого електропостачання на ядерних енергоустановах. Визначальними факторами кваліфікації надійності аварійного живильного насоса з пароприводом є причини, умови та наслідки гідродинамічних ударів, які супроводжуються імпульсним високоамплітудним зростанням тиску та різким гальмуванням потоку. У результаті розрахункової кваліфікації надійності аварійного живильного насоса з пароприводом для керування аваріями з повною втратою тривалого електропостачання встановлено, що максимальні амплітуди тиску гідроударів не перевищують 0,2 МПа. Зменшення максимальних амплітуд тиску гідроударів можливо за рахунок скорочення часу пуску аварійного живильного насоса з пароприводом і впливу параметрів чутливості напірної витратної характеристики насоса. В результаті розрахунково-експериментальної кваліфікації працездатності аварійного живильного насоса з пароприводом для керування аваріями з повною втратою тривалого електропостачання встановлено, що мінімально допустимий тиск пара у парогенераторі становить 0,18 МПа, а час виходу на робочий (що встановився) режим — не менше 750 с. У цьому інтервалі часу відносна потужність залишкових тепловиділень є значною і становить не більше 70 %. Тому необхідно обґрунтування альтернативних технічних рішень ефективного керування аваріями з повною втратою тривалого електропостачання на початковому етапі до виходу насоса з пароприводом на робочий (що встановився) режим.

**Ключові слова:** керування аваріями з повною втратою тривалого електропостачання, ядерні енергоустановки.

*V.I. Skalozubov, V.M. Spinov,  
A.V. Luzhanskaya, I.A. Klimchuk, T.V. Gablaya*

## STEAM DRIVE PUMPS AT MANAGING THE NUCLEAR POWER PLANTS ACCIDENTS WITH COMPLETE LOSS OF LONG-TERM POWER SUPPLY

The accident with the complete loss of long-term power supply due to a tsunami flooding became the main cause of damage to nuclear fuel, devastating steam and gas explosions and catastrophic environmental consequences at the Fukushima-Daiichi nuclear power plant in 2011. After the Fukushima accident, the entire world nuclear community under the auspices of IAEA and the National Nuclear Safety Regulators came to the unequivocal conclusion about the necessity to improve emergency preventing measures and technical means to improve the management of accidents at nuclear power plants with complete loss of long-term power supply. One of such approaches to that problem solution refers to the development and implementation of

an emergency feed pump steam-driven from the nuclear power plant steam generator, which does not require power supply and provides adequate duplication of the emergency feed pump design system. Elaborated are several methods of qualifying for reliability and operability the steam-driven emergency feed pump for management of accidents with a continued power supply full loss at nuclear power plants. The determining factor in qualifying the steam-driven emergency feed pump reliability refers to the cause, conditions and consequences of hydrodynamic shocks, accompanied by a pulsed high-amplitude increase in pressure and a sharp inhibition of flow energy. As a result of the design qualification of the steam-driven emergency feed pump reliability for controlling the accidents with complete loss of long-term power supply, it is established that the maximum amplitudes of hydraulic shock pressure never exceed 0,2 MPa. The hydraulic shock pressure maximum amplitudes reduction is possible due to the shortened launching time of the steam-driven emergency feed pump and the influence of the pump pressure-flow characteristic sensitivity parameters. At the issue of calculations and experimental qualification of the steam-driven emergency feed pump operability at accident management when a complete loss of long-term power supply, it is established that the minimum allowable steam pressure in the steam generator is 0,18 MPa; and the time of reaching the operative (steady) regime is not less than 750 s. In this time interval, the relative power of residual heat is significant and never exceeds 70 %. Therefore, necessary is to substantiate alternative technical solutions for effective management of accidents with a complete loss of long-term power supply at the initial stage before the steam-driven pump reaches its operating (established) mode.

**Keywords:** management of accidents with a complete loss of long-term power supply, nuclear power plants.

1. IAEA International fact expert mission of the Fukushima-Daiichi NPP accident following the Great East Japan earthquake and tsunami. *IAEA Mission Report. IAEA. 2011. 160 p.*
2. Скалозубов В.И., Комаров Ю.А., Шавлаков А.В. Научно-технические основы мероприятий по повышению безопасности АЭС с ВВЭР. Монография. Чернобыль : ИПБ АЭС НАНУ, 2010. 200 с.
3. Бахметьев А.М., Большухин М.А., Бабин В.А. Задачи обоснования СПОТ защитной оболочки для АЭС нового поколения. ФГУП-ОКБМ-АЭП. *Материалы конференции «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР»*. Подольск : ФГУП ОКБ «Гидропресс». 2008. С. 116–129.
4. Наффаа Х.М., Дубковский В.А. Классификация систем пассивного отвода остаточных тепловыделений от защитных оболочек ядерных реакторов. *Праці Одеського політехнічного університету*. 2014. Вип. 1(43). С. 104–112.
5. Королев А.В., Деревянко О.В. Резервная подпитка парогенераторов АЭС в условиях электробесточивания энергоблока. *Ядерна та радіаційна безпека*. 2014. 2(62). С. 10–12.
6. Королев А.В., Деревянко О.В. Композиционная конструкция турбоприводов насосного агрегата для резервной подпитки парогенераторов АЭС. *Праці Одеського політехнічного університету*. 2014. № 1 (43). С. 93–97.
7. Determining the conditions for the hydraulic impacts emergence at hydraulic systems. A.S. Mazurenko, V.I. Skalozubov, I.L. Kozlov, D.S. Pirkovskiy, O.A. Chulkin. *Problems of the Regional Energetics*. 2017. N 12 (34). P. 98–104.
8. Анализ критических условий надежности при гидроударах в активных системах безопасности ядерных энергетических установок с ВВЭР-1000. В.И. Скалозубов, И.Л. Козлов, О.А. Чулкин, Ю.А. Комаров, О.И. Пионтковский. *Ядерна та радіаційна безпека*. 2019. № 1. С. 42–45.
9. Method for determination of water hammer conditions & consequences in VVER pressurizer. V.I. Skalozubov, O.A. Chulkin, D.S. Pirkovsky, I.L. Kozlov, Yu.A. Komarov. *Turkish journal of Physics*. 2019. 43, N 3. P. 229–235. <http://journals.tubitak.gov.tr/physics/issues/fiz-19-43-3/fiz-43-3-1-1809-5.pdf>. 2019
10. Water Hammers in transonic modes of steam-liquid flows in NPP equipment. V. Skalozubov, N. Bilous, D. Pirkovsky, I. Kozlov, Yu. Komarov, O. Chulkin. *Ядерна та радіаційна безпека*. 2019. № 2 (82). С. 46–49.
11. Мазуренко А.С., Скалозубов В.И., Пирковский Д.С., Чулкин О.А. Анализ применимости результатов экспериментальных исследований гидродинамики к насосным системам тепловых и ядерных энергоустановок. *Ядерна енергетика та довкілля*. 2017. № 1 (19). С. 49–52.
12. Климчук А.А., Ложечников В.Ф., Михайленко В.С., Ложечникова Н.В. Усовершенствованная математическая модель динамики уровня жидкости в барабанном парогенераторе как объекте управления. *Международный научно-технический журнал «Проблемы управления и информатики»*. 2019. № 3. С. 54–63.

Получено 04.09.2019