

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ РЕЖИМОВ НАТРИЕВОГО ПАРОГЕНЕРАТОРА ЭНЕРГОБЛОКА БН-600

П.П. Говоров

Белоярская АЭС, г. Заречный



Выполнен анализ поведения границ области гидродинамической неустойчивости в испарительных модулях прямоточного парогенератора (ПГ), обогреваемого натрием. Приведены рекомендации по повышению устойчивости испарительных модулей в пусковых режимах.

Безопасность энергетических установок с ядерными реакторами во многом определяет надежная работа системы отвода тепла, одним из основных элементов которой является парогенератор. Надежная и безопасная работа парогенератора в значительной мере зависит от температурных и гидравлических режимов, их соответствия проектным условиям.

В промышленных парогенераторах при определенном сочетании режимных параметров может иметь место неустойчивость течения рабочего тела при работе на стабильном участке статической гидравлической характеристики при постоянном перепаде давления. По своему характеру – это самоподдерживающиеся периодические колебания расхода рабочего тела, которые вызываются динамическими взаимодействиями между параметрами потока (скоростью, плотностью, энтальпией и их распределением) вследствие транспортного и инерционного запаздывания и наличия механизма обратной связи. Следствием возникновения периодических колебаний расхода является неправильное распределение потока между отдельными модулями парогенератора, теплообменными трубами или внутри труб, ухудшение тепловых характеристик, наличие циклических термических напряжений в месте кризиса теплообмена, в верхней трубной доске и в зоне выходного патрубка [1,2].

Термические колебания, обусловленные колебаниями точки кризиса теплообмена, могут приводить к отслаиванию окисного слоя от поверхности трубы, что способствует коррозии. Длительное воздействие указанных негативных факторов в конечном итоге может вызвать разрушение теплообменных трубок или трубных досок вследствие усталостного разрушения металла [3].

Отмеченная динамическая неустойчивость имеет две характерные области [4]:

1) при значениях выходной относительной энтальпии потока ($X_{\text{вых}}$), близких к нулю, здесь определяющую роль играют колебания гравитационной составляющей перепада давления;

2) при умеренных ($X_{\text{вых}} \approx 1$) и больших ($X_{\text{вых}} > 1$) значениях относительной энтальпии потока на выходе, когда основную роль играют колебания составляющей

перепада давления на трение. Часто второй случай называют неустойчивостью плотностных волн [5].

На энергоблоке с быстрым натриевым реактором БН-600 для организации отвода тепла от реактора и производства пара используются прямоточные секционные парогенераторы с натриевым обогревом типа ПГН-200М. В процессе эксплуатации этих парогенераторов в их испарительных модулях неоднократно имела место гидродинамическая неустойчивость [6–8]. Неустойчивость проявлялась в виде самогенерируемых низкочастотных колебаний расхода питательной воды, которые возникали в переходных режимах при работе испарителей с выходной относительной энтальпией потока превышающей единицу.

Опасность таких неустойчивых гидродинамических режимов заключается еще и в том, что существует вероятность перехода гидродинамической неустойчивости в испарителях в общеконтурную. Это может привести к колебаниям выходной температуры греющего теплоносителя и передаче температурных возмущений в реактор.

Известно, что переходные режимы являются наиболее важными режимами, определяющими расчетный ресурс парогенераторов. Поэтому при рассмотрении вопроса о ресурсе испарителей необходимо изучение проблемы обеспечения их устойчивой работы во всем диапазоне изменения мощности на протяжении всего срока эксплуатации.

Анализ пусковых режимов, выполненный в [8], показал, что существовавший на то время регламент пуска не обеспечивал устойчивую работу испарителей в этом режиме эксплуатации энергоблока. В определенных диапазонах изменения мощности испарители имели малый запас до границы области гидродинамической неустойчивости, недостаточный для обеспечения устойчивой работы испарителей при выполнении технологических операций. Оказалось, что наиболее склонны к попаданию в область неустойчивости испарители с большой длительностью эксплуатации (суммарной наработкой), т.е. в процессе эксплуатации испарителей происходит увеличение области гидродинамической неустойчивости [7, 8].

Исходные данные, полученные при эксплуатации ПГ энергоблока БН-600, указывали на наличие возмущающих причин, устранение или учет которых позволяет организовать надежную эксплуатацию ПГ и предотвратить ситуации с повреждением теплообменных трубок, приводящие к течи воды в натрий с соответствующими аварийными последствиями.

Используя экспериментальные данные, полученные для испарителей парогенератора ПГН-200М, была разработана методика расчета границ гидродинамической неустойчивости с учетом состояния их теплообменной поверхности [8].

Для анализа изменения границ области гидродинамической неустойчивости в испарителях при пуске энергоблока были выполнены расчеты испарителей по данной методике и построены карты устойчивости. Расчеты проводились по параметрам испарителей в диапазоне от 15 до 75% номинальной мощности секции, для режима работы энергоблока с отключенным регенеративным подогревом питательной воды (температура воды на входе в парогенератор равна 160°C). Указанный диапазон мощности испарителей соответствует работе энергоблока на мощности 18–60% номинальной. Расход натриевого теплоносителя в этом диапазоне составляет 70% номинального, а при подключении модулей промежуточного перегрева пара (на мощности 18% $N_{\text{ном}}$) кратковременно увеличивается до номинального значения.

Выполненные расчеты показали, что в исследуемом диапазоне мощности возможны три типа расположения области неустойчивости, они приведены на рис. 1:

1) возникновение гидродинамической неустойчивости возможно во всем исследуемом диапазоне мощности;

2) между областями неустойчивости имеется область устойчивости (на рис. 1 она обозначена цифрой I), в которой максимально достижимое значение выходной относительной энтальпии потока для принятых параметров испарителей меньше граничного значения;

3) области неустойчивости предшествует область устойчивости типа I.

Результаты расчетов в виде карты устойчивости испарителя в координатах выходная относительная энтальпия – относительная мощность испарителя (в % от номинальной мощности секции парогенератора) для различных значений выходного давления приведены на рис. 2, из которого видно, что на границе устойчивости:

- при постоянном давлении зависимость выходной относительной энтальпии от теплового потока является линейной в диапазоне изменения мощности испарителя, свыше 30% (от номинальной мощности секции);

- с увеличением расхода натриевого теплоносителя значение выходной относительной энтальпии уменьшается, причем наиболее значительное уменьшение наблюдается в области малых значений мощности испарителя $\leq 35\%$;

- в диапазоне мощности испарителя 15–38% находится область устойчивости (I типа), в которой максимально достижимое значение выходной относительной энтальпии потока меньше граничного значения, и для обеспечения устойчивой работы испарителей достаточно поддерживать выходное давление не ниже определенного уровня;

- увеличение расхода натриевого теплоносителя приводит к уменьшению области устойчивости I типа;

- выходная температура натриевого теплоносителя не оказывает влияния непосредственно на значение выходной относительной энтальпии, но при ее снижении (при условии постоянства расхода натриевого теплоносителя) уменьшается максимально достижимое значение энтальпии, что приводит к увеличению области устойчивости I типа.

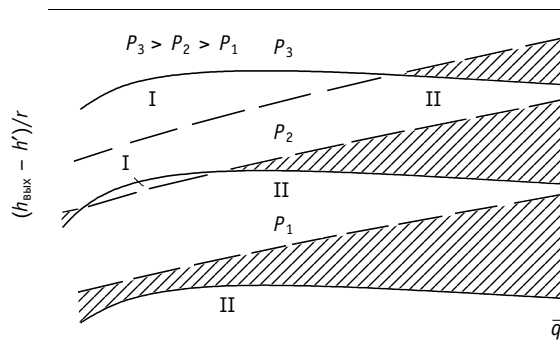


Рис. 1. Влияние давления и теплового потока на границу устойчивости испарителя: I, II – области устойчивой работы; область неустойчивости; — граничное значение; — — максимально достижимое значение

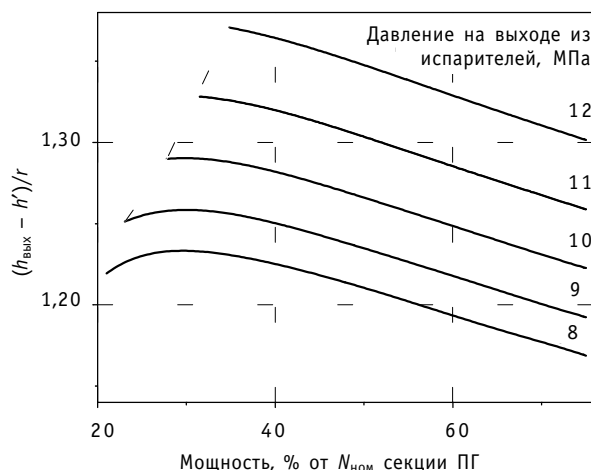


Рис. 2. Карта устойчивости испарителей парогенератора ПГН-200М при расходе натриевого теплоносителя 0,7 номинального, температуре натрия на выходе из теплоносителей 325°C, наработке 105 тыс. ч

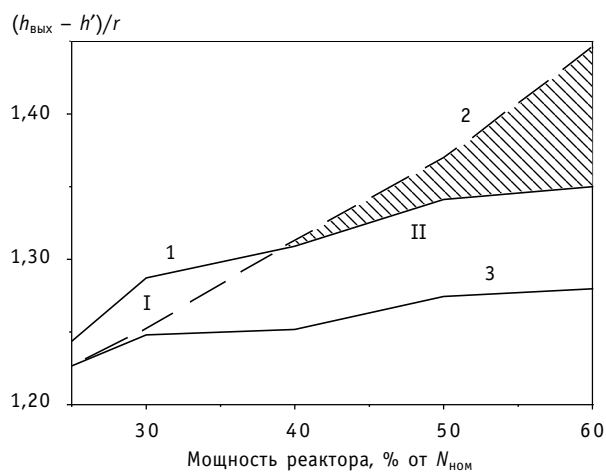


Рис. 3. Граница устойчивости испарителей в пусковом режиме: I, II — области устойчивой работы; область неустойчивости; 1 — граничное значение; 2 — максимально достижимое значение; 3 — рекомендуемое значение

Результаты анализа устойчивости испарителей при различных тепловых нагрузках позволили разработать рекомендации по оптимизации пускового режима парогенератора при работе испарителей в режиме генерации перегретого пара до мощности энергоблока 60% номинальной.

Разработанные рекомендации заключаются в поддержании параметров испарителей — выходной температуры и давления пара — ниже значений, при которых возникает гидродинамическая неустойчивость, а именно:

- на уровне мощности энергоблока 18% номинальной — 370–375°C при давлении 9–10 МПа;
- в диапазоне изменения мощности энергоблока 25–40% номинальной — 380–385°C при давлении 10–11 МПа;
- на уровнях мощности 40–60% номинальной — 385–395°C при давлении 11,5–12,5 МПа.

Поддержание параметров испарителей на указанных уровнях обеспечивает их работу в области устойчивости I типа примерно до мощности энергоблока, равной 38% номинальной (рис. 3), и дает достаточный для обеспечения устойчивой работы испарителей запас на более высоких уровнях мощности.

При возникновении гидродинамической неустойчивости в испарителях в переходных режимах подавление колебаний расхода воды осуществляется повышением давления пара за испарителями, а в случае невозможности подъема давления по техническим причинам — снижением температуры пара путем увеличения расхода воды.

Рекомендации работы внедрены на Белоярской АЭС непосредственно в производственные инструкции по эксплуатации энергоблока БН-600 и парогенераторов ПГН-200М, что позволило устранить гидродинамическую неустойчивость в испарительных модулях и повысить, в значительной степени, надежность и безопасность эксплуатации, как парогенераторов, так и энергоблока в целом.

Литература

1. Вайнк Р., Эффердинг Л. Исследование гидродинамической устойчивости и тепловых характеристик 1-МВт модели прямоточного парогенератора, обогреваемого жидким натрием // Энергетические машины и установки. — 1974. — № 3. — С. 31-44.
2. Воробьев В.А., Лощинин В.М., Ремизов О.В. Нестационарные поля температуры парогенерирующей трубы при колебаниях расхода / Опыт разработки и эксплуатации парогенераторов быстрых реакторов: Сб. докл. — Димитровград: НИИАР, 1982. — С. 405-418.
3. Огорев Л.Е., Лихошерст А.И., Иванов А.И., Титов В.Ф. Методы определения напряжений и долговечности парогенерирующих труб / Опыт разработки и эксплуатации парогенераторов быстрых реакторов: Сб. докл. — Димитровград: НИИАР, 1982. — С. 395-404.
4. Хабенский В.Б., Герлига В.А. Нестабильность потока теплоносителя в элементах энергооборудования. — СПб.: Наука, 1994. — 288 с.

5. Делайе Дж., Гюо М., Ритмюллер М. Теплообмен и гидродинамика двухфазных потоков в атомной энергетике. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 424 с.
6. Бельтюков А.И., Говоров П.П., Шейнкман А.Г. Гидродинамическая неустойчивость в испарителях парогенератора БН-600//Теплофизика высоких температур. – 1998. – Т. 36. – № 3. – С. 496-502.
7. Бельтюков А.И., Говоров П.П. Оценка развития гидродинамической неустойчивости в испарителях прямоточного секционного парогенератора с натриевым обогревом в процессе эксплуатации /Сб. научн. трудов 6-й научно-технической конференции, посвященной 35-летию Белоярской АЭС. – Заречный, 1999. – Ч. 3. – С. 67-75.
8. Говоров П.П. Гидродинамическая неустойчивость секционного парогенератора с натриевым обогревом (на примере энергоблока №3 Белоярской АЭС)/ Автореферат диссертации на соискание ученой степени к.т.н. – Екатеринбург, 2000.
9. Юнал Х. Колебания типа волн плотности в трубе противоточного одноходового парогенератора, обогреваемого натрием//Теплопередача. – 1981. – Т. 103. – № 3. – С.97-105.

Поступила в редакцию 14.02.2005

The method has been developed and the facility manufactured to measure irradiated fuel decay heat directly in the irradiated fuel cooling pond. The important advantage is that the facility has been implemented using the standard equipment and the operations of the irradiated fuel permutation are conducted using the standard means and technologies, thereby providing for the design safety of the work fulfilment. For the first time decay heat of numerous irradiated fuel sub-assemblies of various types has been directly measured.

УДК 621.039.526

Improvement of the Efficiency and the Economics of the Fuel Utilization at the Beloyarsk NPP BN600 Reactor \ G.V. Babenko, A.V. Gavrilov, V.A. Zhyoltyshev, V.V. Maltsev, V.F. Roslyakov; Editorial board of Journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy, Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2005. – 4 pages, 1 table.

Better efficiency and cost advantages of the fuel utilization at the BN600 reactor are offered by increasing fuel burn-up step by step and upgrading the core.

УДК 621.039.526

Irradiation of Experimental MOX Fuel in the BN600 Reactor \ M.V. Bakanov, G.V. Babenko, V.V. Maltsev, V.F. Roslyakov, B.A. Vasiliev, O.V. Mishin, T.A. Klimashina, M.R. Farakshin; Editorial board of Journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy, Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2005. – 5 pages, 3 tables. – References, 3 titles.

The design features of the experimental MOX fuel sub-assemblies, their specific location in the BN600 reactor core, the conditions and the main results of the experimental MOX fuel irradiation in the BN600 reactor are reported.

УДК 621.039.526

The Calculate of Temperature Conditions of the BN-600 Sub-assemblies into Gaseous Medium \ V.V. Golovin, A.I. Karpenko, A.M. Tuchkov; Editorial board of Journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy, Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2005. – 4 pages, 1 table, 2 illustrations.

The possibility of estimated modelling of the heat-up temperature conditions of the BN-600 spent sub-assemblies elements during transportation of them into gaseous medium is showed in article. The estimated modelling of the BN-600 spent sub-assemblies heat-up into gaseous medium with different values residual heat release of the spent sub-assemblies permits to substantiate and optimise the safety procedures of post-irradiation handling with that sub-assemblies.

УДК 532.552

Hydrodynamic Instability in the BN600 Power Unit Steam Generators and its Diagnosis \ P.P. Govorov, A.A. Kuznetsov; Editorial board of Journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy, Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2005. – 4 pages, 2 illustrations.

The article considers the hydrodynamic instability in the once-through steam generators of the BN600 power unit under the transients (startup, shutdown). This process is dangerous because there is a probability of the hydrodynamic instability spread over the entire circuit. This would cause the heating coolant outlet temperature fluctuations and transfer of the temperature perturbations to the primary circuit. Two methods of diagnosing such a process are proposed. On the basis of the covariance analysis method the software which is now under industrial operation has been written for the Beloyarsk NPP data reduction system named Uran.

УДК 621.039.526

Determination of the Allowable Limits of the Steam Superheating Downstream the Evaporators under the Sodium Steam Generator Operating Conditions \ A.I. Beltyukov, P.P. Govorov, A.I. Karpenko; Editorial board of Journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy, Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2005. – 8 pages, 1 table, 3 illustrations.

The paper summarizes the experimental results of the research into the processes of moisture entrainment from the modular water-sodium steam generator evaporator stages of the BN600 power unit and steam generator operating conditions characterizing by the hydrodynamic instability for various running time accumulated by the evaporator stages. By test the optimum operating ranges of the steam generator operational parameters providing for reliable and safe operation of the steam generator within a given lifetime were determined.

УДК 532.552

Improvement of the BN600 Power Unit Sodium Steam Generator Transients \ P.P. Govorov; Editorial board of Journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy, Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2005. – 5 pages, 3 illustrations. – References, 9 titles.

The behaviour of the sodium-heated once-through steam generator evaporator stage hydrodynamic instability range boundaries has been analyzed. The recommendations on the evaporator stage stability improvement under startup transients are given.

УДК 621.039.526

About Connection of the Sodium Flow Rate Distribution in the BN-600 Reactor Primary Circuit with the Reactor Vessel Thermocouples Reading Pattern \A.A. Bychkov, I.M. Krysan'tev; Editorial board of Journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy, Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2005. – 5 pages, 2 tables, 2 illustrations. – References, 2 titles.

The authors present analysis results of the reading of the thermocouples for sodium temperature measurements into the BN-600 reactor vessel (reactor vessel thermocouple) for several operating cycles the BN-600 reactor. The reactor vessel thermocouples reading dependence from hydraulic condition of the BN-600 reactor primary circuit is presented in this article.

УДК 621.039.542

Features of Constructional Materials' Behavior within Fast High-Power Reactor's Spectrum of Neutrons \V.V. Chuyev, V.F. Rosljakov, V.V. Maltsev; Editorial board of Journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy, Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2005. – 14 pages, 5 tables, 13 illustrations. – References, 5 titles.

Present work reviews basic research results of the of experimental and regular fuel subassemblies and fuel pins using an example of reactor's FN-600 for its transformation to the fuel burn out ~11 % h.a.. These results are necessary for substantiation of constructional materials' safe and reliable work within an active third modernization zone.

УДК 621.039.526

Radiation Swelling of Steels in the Fast Reactor Neutron Field \E.A. Kozmanov; Editorial board of Journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy, Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2005. – 6 pages, 4 illustrations. – References, 9 titles.

At present the vast experimental material validating the fact that the pores in steel are formed during in-reactor irradiation due to the unbalanced strains induced by the structural stresses caused by the processes of forming the secondary phases against a background of the degraded internal links. The loss of the phase stability causes an essential change in the physical and mechanical properties of the irradiated materials. The sizes and concentration of pores and precipitations are dependent on temperature. In this paper the phenomenologic presentation of the steel swelling process in the fast reactor neutron field is made on the basis of the applicable experimental data.

УДК 621.039.526

Confirmation of the Design Lifetime of the Test Safety Rods Manufactured of Refabricated Boron Carbide after Operation in the BN600 Reactor \A.V. Zakharov, A.I. Karpenko, E.A. Kozmanov, V.V. Maltsev, V.D. Risovany, A.A. Khudyakov; Editorial board of Journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy, Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2005. – 6 pages, 2 tables, 4 illustrations.

The main results of the in-reactor testing and integrated research conducted by the Russian nuclear reactor research centre and Beloyarsk NPP in support of the utilization of the safety rods manufactured of refabricated boron carbide in the fast reactor are presented. The test rods have smoothly operated under actual conditions without any damage or any change in dimensions or geometry. The total results of the in-reactor testing and primary and scientific post-irradiation examinations of the test safety rods allow the use of the design of these rods having got design lifetime of 580 efpd as a standard one for the BN600 reactor to be recommended.

УДК 621.039.542

Optimization of the Structural Condition of Fuel Cladding Material \M.V. Bakanov, V.V. Chuev, O.V. Kryukov, A.V. Lukin, S.A. Bychkov, Yu.P. Budanov, O.S. Korostin, A.V. Tselishchev, V.B. Tarasyuk; Editorial board of Journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy, Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2005. – 7 pages, 2 tables, 5 illustrations. – References, 7 titles.

The technology of the especially thin-walled cold-worked tubes sizing 6.9 by 0.4 mm of '4C68' steel is outlined. The ways of the fuel pin technology advancement aimed at obtaining better fuel pin radiation resistance in the BN600 reactor are reviewed. The long-term strength of the tubes manufactured following the advanced technology is better than that of the tubes supplied earlier.