

## ГИДРОДИНАМИЧЕСКАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ В ПАРОГЕНЕРАТОРАХ ЭНЕРГБЛОКА БН-600 И ЕЕ ДИАГНОСТИРОВАНИЕ

**П.П. Говоров, А.А. Кузнецов**

*Белоярская АЭС, г. Заречный*



В статье рассматривается гидродинамическая неустойчивость в прямоточных парогенераторах энергоблока БН-600 в переходных режимах работы (пуск, останов). Опасность этого процесса заключается в том, что существует вероятность перехода гидродинамической неустойчивости в общеконтурную. Это приведет к колебаниям выходной температуры греющего теплоносителя и передаче температурных возмущений в первый контур. Предложены два метода диагностирования такого процесса. На основании метода ковариационного анализа была написана программа для информационной вычислительной системы «Уран» Белоярской АЭС, которая в настоящее время находится в промышленной эксплуатации.

### ВВЕДЕНИЕ

На энергоблоке с быстрым натриевым реактором БН-600 для организации отвода тепла от реактора и производства пара используются прямоточные секционные парогенераторы типа ПГН-200М. В таких парогенераторах при определенном сочетании режимных параметров (мощность, давление, температура, расход питательной воды) могут наблюдаться самоподдерживающиеся колебания расхода рабочего тела, так называемая гидродинамическая (или колебательная) неустойчивость, проявляющаяся в переходных режимах в виде самогенерируемых низкочастотных колебаний расхода питательной воды.

Графики изменения расходов питательной воды через испарители парогенератора при возникновении и развитии гидродинамической неустойчивости представлены на рис. 1. Начало процесса гидродинамической неустойчивости характеризуется появлением пульсаций расходов питательной воды через модули, при этом в одном модуле (группе модулей) амплитуда колебаний находится в противофазе амплитуде колебаний в других модулях.

Следствием возникновения периодических колебаний расхода является неоптимальное 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. Опасность таких неустойчивых гидродинамических режимов заключается еще и в том, что существует вероятность перехода гидродинамической неустойчивости в испарителях в общеконтурную. Это приведет к колебаниям выходной температуры греющего теплоносителя и передаче темпера-

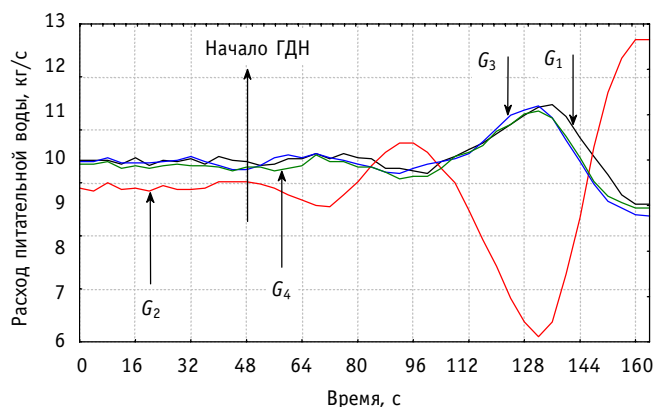


Рис.1. Расходы питательной воды через испарители парогенератора при начале гидродинамической неустойчивости

турных возмущений в первый контур. Таким образом, своевременная диагностика гидродинамической неустойчивости (ГДН) позволит повысить надежность и безопасность эксплуатации энергоблока с реактором БН-600 и продлить срок службы оборудования.

### ВЫБОР МЕТОДА ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ГДН

Для диагностирования гидродинамической неустойчивости рассматривались

- метод дисперсионно-корреляционного анализа расходов питательной воды и температур рабочего тела на выходе испарителей парогенераторов ПГН-200М;
- метод ковариационного анализа расходов питательной воды.

При использовании первого метода

- вычисляются дисперсии и среднеквадратичные отклонения расходов питательной воды для всех испарительных модулей;

- сравниваются полученные значения среднеквадратичных отклонений расходов с заранее определенными уставками по границе области устойчивой работы;

- в случае превышения величин уставок по среднеквадратичным отклонениям одновременно вычисляются

– дисперсии, среднеквадратичные отклонения, коэффициенты ковариации и корреляции с величинами расходов питательной воды (для величин температур рабочего тела на выходе из испарительных модулей);

– среднеквадратичные отклонения за последующие промежутки времени (для величин расходов питательной воды);

- в случае достижения коэффициентами корреляции расходов и температур пара значений, превышающих уставки (хорошая корреляция), делается вывод об отсутствии автоколебаний (изменения расходов и обратные им изменения температур указывают на работу регуляторов расхода питательной воды);

- в случае стабильно высоких значений среднеквадратичных отклонений расходов воды делается вывод о начале автоколебаний расходов в рассматриваемых испарительных модулях (в противном случае, когда величины среднеквадратичных отклонений с течением времени смещаются в область устойчивой работы, можно утверждать как об аperiодических колебаниях, так и о несущественных кратковременных автоколебаниях);

- вычисляются коэффициенты ковариации и корреляции между парами величин расходов воды в испарительные модули: отрицательные величины коэффициентов ковариации и корреляции указывают на противофазность автоколебаний и на нали-

чие гидродинамической неустойчивости расхода питательной воды именно между рассматриваемыми модулями; положительные – на отсутствие неустойчивости между испарительными модулями;

- на основании результатов расчета коэффициентов корреляции локализуются группы испарительных модулей с развившейся гидродинамической неустойчивостью.

Проведенные в дальнейшем исследования позволили отказаться от некоторых этапов в методе дисперсионно-корреляционного анализа. В частности,

- полную картину о наличии/отсутствии ГДН и изменении расходов через испарители регуляторами расхода воды можно получить без анализа температур рабочего тела;

- по знаку рассчитанных коэффициентов ковариации можно судить о наличии/отсутствии в рассматриваемых парах испарителей гидродинамической неустойчивости, и последующее вычисление коэффициентов корреляции не требуется;

- по величине коэффициентов ковариации можно судить о размахе колебаний расходов питательной воды, и вычисление и последующее сравнение среднеквадратичных отклонений с заранее определенными уставками не требуется.

Исходя из вышеизложенного, на основании дисперсионно-корреляционного метода диагностики был разработан метод ковариационного анализа гидродинамической неустойчивости расходов питательной воды в парогенераторах ПГН-200М.

## **МЕТОД КОВАРИАЦИОННОГО АНАЛИЗА ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ В ПАРОГЕНЕРАТОРАХ ПГН-200М**

### **Описание метода**

При гидродинамической неустойчивости величины расходов в испарительных модулях периодически уменьшаются и увеличиваются в противофазе. Значения коэффициентов ковариации для пар модулей с гидродинамической неустойчивостью смещаются в отрицательную область, в то время как при изменении расходов питательной воды регуляторами расхода коэффициенты ковариации положительные.

Средняя величина расхода питательной воды определяется по следующей формуле:

$$\bar{G}_i^n = \frac{1}{n} \cdot \sum_{k=1}^n G_i^k, \text{ т/ч}, \quad (1)$$

где  $G_i^k$  – величина расхода питательной воды на входе в  $i$ -й испарительный модуль в момент времени  $k$ , т/ч;  $n$  – количество точек усреднения, определяется опытным путем.

Коэффициент ковариации (характеризует абсолютную степень рассеяния одной величины относительно другой величины)

$$\delta_{i,j}^n = \frac{1}{n-1} \cdot \sum_{k=1}^n (G_i^k - \bar{G}_i^n) \cdot (G_j^k - \bar{G}_j^n), \text{ (т/ч)}^2, \quad (2)$$

где  $G_i^k$  – величина расхода питательной воды на входе в  $i$ -й испарительный модуль в момент времени  $k$ , т/ч;  $G_j^k$  – величина расхода питательной воды на входе в  $j$ -й испарительный модуль в момент времени  $k$ , т/ч;  $\bar{G}_i^k$  – усредненное по  $n$  точкам значение расхода питательной воды на входе в  $i$ -й испарительный модуль, т/ч;  $\bar{G}_j^k$  – усредненное по  $n$  точкам значение расхода питательной воды на входе в  $j$ -й испарительный модуль (причем  $i \neq j$ ), т/ч;  $n$  – количество точек усреднения (количество временных интервалов усреднения расходов).

Для исключения появления ложных сигналов о начале ГДН (появления сигналов ГДН при колебаниях расходов с малой амплитудой, не приводящих к развитию процесса гидродинамической неустойчивости), для принятия решения о наличии/отсутствии гидродинамической неустойчивости в рассматриваемой паре испарителей проводится  $m$  расчетов коэффициентов ковариации по «скользящему» принципу (где  $m$  – критерий принятия решения, равный 5, подбирался опытным путем в процессе отладки методики с учетом допустимых временных задержек от начала процесса до появления сигнала о ГДН). После вычисления  $m$  значений коэффициентов ковариации для рассматриваемой пары испарительных модулей производится усреднение полученных коэффициентов и сравнение среднего коэффициента ковариации с заранее определенной уставкой, равной  $-1.5$ . При значении коэффициента ковариации, большем по абсолютному значению уставки, делается вывод о синфазности колебаний; при значении, меньшем по абсолютному значению уставки – о гидродинамической неустойчивости (противофазных колебаниях) в рассматриваемой паре испарительных модулей.

### Результаты диагностики ГДН методом ковариационного анализа

Изменения расходов питательной воды через испарители во время пуска блока и сигнала гидродинамической неустойчивости, сформированного по представленной выше методике, показаны на рис. 2. С появлением противофазных колебаний расходов воды через испарительные модули сигнал ГДН, бывший до этого равным нулю (отсутствие колебаний), становится равным единице (гидродинамическая неустойчивость в рассматриваемой паре испарителей).

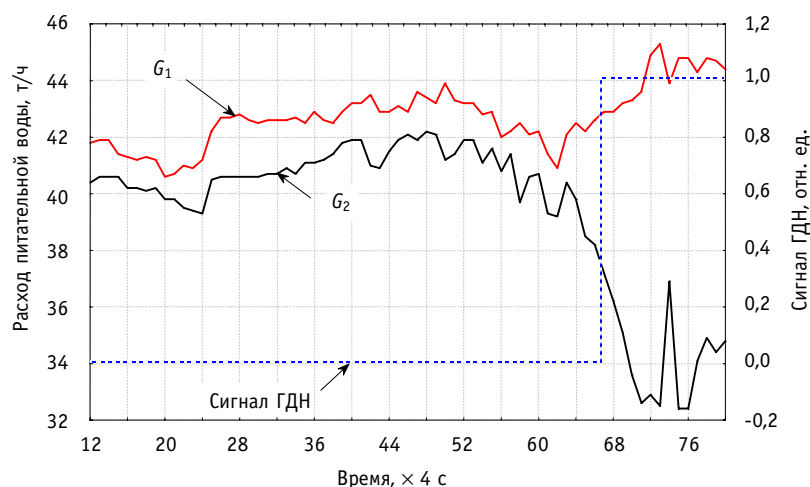


Рис.2. Изменения расходов воды через испарители парогенератора и сигнала ГДН в этих испарителях

На основе представленного метода ковариационного анализа был разработан алгоритм диагностики гидродинамической неустойчивости и была написана программа Stable для информационной вычислительной системы «Уран» Белоярской АЭС по диагностике гидродинамической неустойчивости в испарителях парогенераторов энергоблока с реактором БН-600. Тестовые испытания этой программы дали положительные результаты, и в настоящее время она находится в промышленной эксплуатации.

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.