

УДК 536.24

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НАПОРНО-РАСХОДНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЖЕКТОРА ДЛЯ СИСТЕМЫ АВАРИЙНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ АКТИВНОЙ ЗОНЫ АЭС С ВВЭР

¹Блинков В.Н., ¹Мелихов В.И., ¹Мелихов О.И., ¹Парфенов Ю.В.,

¹Никонов С.М., ¹Елкин И.В., ²Трубкин Е.И., ³Якуш С.Е.

¹Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт», Москва, e-mail: parfenov@erec.ru;

²ОАО «Электрогорский научно-исследовательский центр по безопасности атомных электрических станций», Московская область, Электрогорск;

³Институт проблем механики им. А.Ю. Иилинского РАН

Статья посвящена расчетно-экспериментальному исследованию напорно-расходной характеристики эжектора для системы аварийного охлаждения активной зоны атомной электрической станции (АЭС) с водо-водяным энергетическим реактором (ВВЭР). В инновационных проектах АЭС в системе аварийного и планового расхолаживания первого контура реакторной установки планируется использовать агрегат «насос-эжектор», который представляет собой соединение насоса высокого давления и водо-водяного эжектора, устанавливаемого на напорной стороне насоса. В статье представлены результаты экспериментальных исследований расходно-напорной характеристики эжектора, полученные в ОАО «ЭНИЦ». Результаты расчетов напорно-расходной характеристики с помощью инженерной методики [3] хорошо согласуются с экспериментальными данными. При этом расчеты указали на возникновение кавитационного режима работы камеры смешения. Кавитация в эжекторе сопровождалась режимом так называемого предельного расхода среды, характерным тем, что снижение давления за участком кавитации не сопровождается увеличением расхода. С помощью кода REMIX [2] было рассчитано пространственное распределение гидродинамических параметров в эжекторе при различных граничных условиях экспериментов.

Ключевые слова: эжектор, АЭС с ВВЭР, САОЗ

CALCULATION-EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE HEAD-FLOW RATE CHARACTERISTIC OF THE EJECTOR FOR EMERGENCY CORE COOLING SYSTEM OF THE NPP WITH VVER

¹Blinkov V.N., ¹Melikhov V.I., ¹Melikhov O.I., ¹Parfenov Y.V., ¹Nikonov S.M.,

¹Elkin I.V., ²Trubkin E.I., ³Yakush S.E.

¹National Research University «Moscow Power Engineering Institute», Moscow, e-mail: parfenov@erec.ru;

²Joint Stock Company «Electrogorsk Research and Engineering Center on NPP Safety», Moscow Region, Electrogorsk;

³Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of Sciences, Moscow

The calculative-experimental investigation of the head-flow characteristic of the ejector for emergency core cooling system of the Nuclear Power Plant with water-water power reactor (WVER) is presented in the paper. The unit «pump-ejector» is planning to be installed in the system of the accidental and plan cooling of the reactor primary circuit of the innovative NPP projects. This unit consists of the high pressure pump and water-water ejector on the head side of the pump. The experimental results of the head-flow ejector characteristic obtained in the JSC «EREC» are presented in the paper. The calculation results for head-flow characteristic obtained by the engineering method presented in [3] are in a good agreement with the experimental ones. These results predict the occurrence of the cavitation regime in the mixing chamber of the ejector. The cavitation is accompanied with the so-called regime of the limited flow rate of the fluid which is characterized by the phenomenon, that the decreasing of the pressure after the cavitation section is not accompanied with the increasing of the flow rate. The space distribution of the hydrodynamic parameters in the ejector was calculated with REMIX [2] code for different boundary conditions of the experiment.

Keywords: ejector, NPP with VVER, ECCS

В инновационных проектах атомных электрических станций (АЭС) с водо-водяным энергетическим реактором в системе аварийного и планового расхолаживания первого контура реакторной установки планируется использовать агрегат «насос-эжектор», который представляет собой соединение насоса высокого давления и водо-водяного эжектора, устанавливаемого на напорной стороне насоса. Предполагается,

что в аварийных условиях в случае высокого давления в первом контуре (от 8 до 2 МПа) будет работать только насос высокого давления, а при снижении давления ниже 2 МПа в работу также включится эжектор, увеличивая расход подаваемой воды, что соответствует режиму работы насоса системы аварийного охлаждения активной зоны (САОЗ) низкого давления. Агрегат «насос-эжектор» должен обеспечивать на-

порно-расходную характеристику, близкую к характеристике насосов высокого и низкого давлений САОЗ, которые используются в настоящее время на действующих АЭС с водо-водяным энергетическим реактором (ВВЭР). В настоящей работе выполнено расчетно-экспериментальное исследование напорно-расходной характеристики одного из вариантов конструкции эжектора в рамках анализа возможности его использования в САОЗ АЭС с ВВЭР.

Цель работы: расчетно-экспериментальное исследование расходно-напорной характеристики эжектора для САОЗ АЭС с ВВЭР.

Материал и методы исследования

В Электрогорском научно-исследовательском центре по безопасности атомных электрических станций (ОАО «ЭНИЦ») на стенде КЦ было проведено экспериментальное исследование расходно-напорной характеристики эжектора в рамках анализа возможности его использования в САОЗ АЭС с ВВЭР. На рис. 1 представлена схема проточной части эжектора. Диапазон давлений рабочей воды составлял 3,5–6 МПа, давление инжектируемой воды – 0,216–0,22 МПа, расход рабочей воды – 230–303 т/ч, расход инжектируемой воды – 55–276 т/ч, температура рабочей воды – 28–67°С, температура инжектируемой воды – 27–67°С.

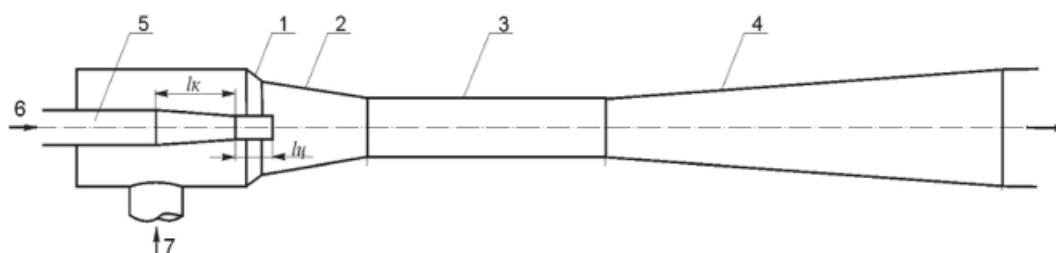


Рис. 1. Схема проточной части эжектора:
1 – 2 – пассивное сопло; 3 – камера смешения; 4 – диффузор; 5 – рабочее сопло;
6 – подвод рабочей воды, 7 – подвод инжектируемой воды

Расчетное исследование напорно-расходной характеристики проводилось с помощью инженерной методики [3] и кода REMIX [2], разработанного на основе кода BOR3D [1, 4–5]. REMIX – это трехмерный код CFD класса, включающий в себя, в частности:

- трехмерные нестационарные уравнения;
- конечно-объемную дискретизацию уравнений;
- совместное решение уравнений сохранения момента и массы;
- модели сжимаемых и несжимаемых течений;
- модели турбулентного течения.

Результаты исследования и их обсуждение

Результаты экспериментальных исследований

Экспериментальные исследования показали, что снижение давления на выходе из диффузора эжектора сначала вызывает увеличение расхода коэффициента инжекции, определяемого как отношение расхода инжектируемой воды к расходу рабо-

чей воды. Однако при некотором значении давления достигается предельное значение коэффициента инжекции и дальнейшее уменьшение давления на выходе из диффузора больше не приводит к возрастанию коэффициента инжекции (рис. 2). Максимальный расход из диффузора эжектора, соответствующий предельному коэффициенту инжекции, составил ~ 570 т/ч. В то же время одно из требований к эжектору, который мог бы войти в агрегат «насос-эжектор» системы САОЗ АЭС с ВВЭР, состоит в том, что максимальный расход на выходе из диффузором был бы не менее 900 т/ч.

Расчет расходно-напорной характеристики с помощью методики [3]

На основе подхода, изложенного в [3], были выполнены расчеты расходно-напорной характеристики эжектора. Формула для расчета характеристики струйного насоса имеет следующий вид [3]:

$$\frac{\Delta p_c}{\Delta p_p} = \frac{f_{p1}}{f_3} \left[1,76 + 0,7 \frac{v_n}{v_p} \frac{f_{p1}}{f_{n2}} U^2 - 1,07 \frac{v_c}{v_p} \frac{f_{p1}}{f_3} (1+U)^2 \right], \quad (1)$$

где $\Delta p_c = p_c - p_n$; $\Delta p_p = p_p - p_n$; p_p – давление рабочего потока; p_n – давление инжектируемого потока; p_c – давление смешанного потока на выходе из диффузора; v_p – удельный объем рабочей среды; v_n – удельный объем инжектируемой среды; v_c – удельный объем смешанной среды; f_{p1} – площадь выходного

сечения рабочего сопла; f_3 – площадь выходного сечения камеры смешения; $f_{n2} = f_3 - f_{p1}$ – площадь инжектируемого потока во входном сечении камеры смешения; U – коэффициент инжекции, равный отношению расхода инжектируемой воды к расходу рабочей воды.

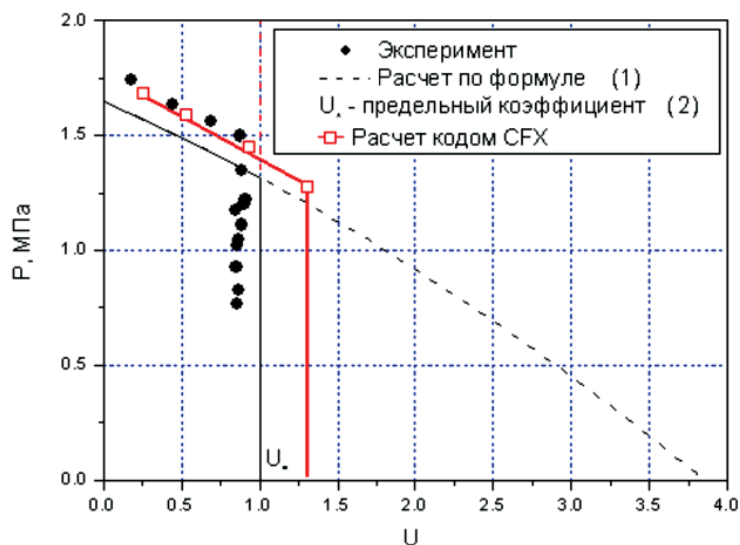


Рис. 2. Зависимость давления на выходе из диффузора от коэффициента инжекции

На рис. 2 показаны результаты расчета по формуле (1). В [3] указывается на то, что при некоторых параметрах возможно возникновение кавитационного режима камеры смешения, когда давление во входном сечении цилиндрической камеры смешения становится равным давлению кипения смешанного потока, проходящего через камеру

смешения. Кавитация в струйных насосах сопровождается режимами так называемого предельного расхода среды, характерными тем, что снижение давления за участком кавитации не сопровождается увеличением расхода. Предельный кавитационный коэффициент инжекции согласно [3] имеет следующий вид:

$$U_* = \frac{0,925}{0,95} \left[\frac{f_3}{f_{p1}} - \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{p_n - p_*}{\Delta p_p}}} \right] \sqrt{\frac{p_n - p_*}{\Delta p_p}}. \quad (2)$$

Расчет по (2) дает $U^* = 1$, что также показано на рис. 2.

Таким образом, имеет место достаточно хорошее совпадение между расчетом по методике [3] и экспериментальными данными.

Расчет с помощью кода REMIX

Для расчета с помощью кода REMIX была создана расчетная сетка проточной части эжектора, включающая в себя 17408 элементов. В расчетах фиксировался расход рабочей и инжектируемой воды. Расчеты проводились при различном давлении на выходе эжектора после диффузора. При этом главными рассчитываемыми величинами были расход инжектируемой воды и величина минимального давления в эжекторе. В расчетах использовалась k - ϵ -модель турбулентности.

На рис. 3 в качестве примера, представлено распределение давления, полученное в расчете кодом REMIX для давления за диффузором эжектора 16,57 МПа. Для анализа работоспособности эжектора особый интерес представляет расположение области пониженного давления в эжекторе.

Если минимальное давление в эжекторе опустится ниже давления насыщения, соответствующего температуре воды, произойдет кавитация, и увеличение расхода пассивной жидкости будет невозможно. Анализ расчетных результатов показал, что расположение области пониженного давления изменялось для различных значений давлений после диффузора. Для условий, при которых достигались наибольшие величины расхода пассивной жидкости, область пониженного давления располагалась на входе в цилиндрическую камеру смешения.

Значения коэффициентов инжекции, рассчитанные с помощью кода REMIX, представлены на рис. 2. Видно, что результаты инженерной методики [3] лучше согласуются с экспериментальными результатами, чем расчет с помощью кода. Однако код REMIX в отличие от методики [3] предоставляет возможности для анализа пространственного распределения параметров в эжекторе и проведения вариантных расчетов для эжекторов сложной конструкции.

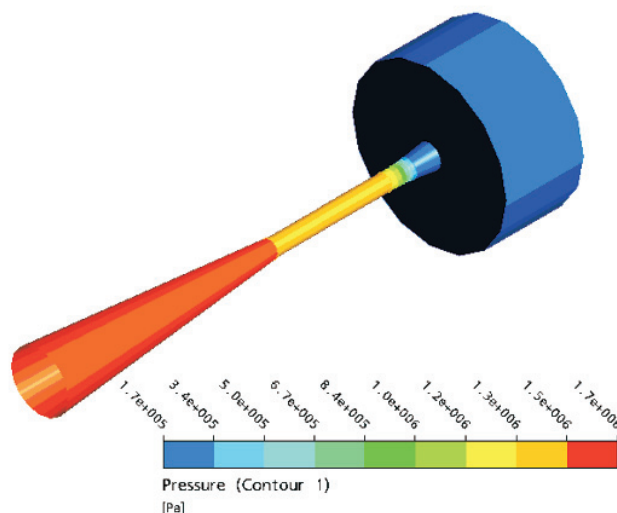


Рис. 3. Распределение давления в эжекторе при давлении за диффузором 16,57 МПа

Выводы

Выполнено экспериментальное исследование напорно-расходной характеристики эжектора для системы аварийного охлаждения активной зоны АЭС с ВВЭР. Максимальный расход потока из диффузора эжектора, соответствующий предельному коэффициенту инжекции, в эксперименте составил ~ 570 т/ч. В то же время максимальный расход через эжектор, который мог бы войти в состав САОЗ АЭС с ВВЭР, должен быть не менее 900 т/ч.

На основе инженерной методики, изложенной в [3], были выполнены расчеты расходно-напорной характеристики эжектора. Было получено достаточно хорошее совпадение между результатами расчета [3] и экспериментальными данными. При этом расчеты указали на возникновение кавитационного режима работы камеры смешения. Кавитация в эжекторе сопровождалась режимом так называемого предельного расхода среды, характерным тем, что снижение давления за участком кавитации не сопровождается увеличением расхода.

С помощью кода REMIX было получено пространственное распределение гидродинамических параметров в эжекторе при различных начальных и граничных условиях эксперимента и расходно-напорная характеристика эжектора.

В ходе дальнейших экспериментально-теоретических работ предполагается доработать конструкцию эжектора для соответствия его характеристик техническим требованиям САОЗ АЭС с ВВЭР.

Работа выполнена в рамках реализации Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы по Госконтракту № 14.В37.21.0151/

Список литературы

1. Исследование разбавления бора в реакторе ВВЭР-1000 / Ю.А. Безруков, С.А. Логвинов, В.И. Мелихов, О.И. Мелихов, С.Е. Якуш // Теплоэнергетика. – 2002. – № 5. – С. 22–26.
2. Численное моделирование перемешивания потоков с различной концентрацией бора кодом REMIX / О.И. Мелихов, В.И. Мелихов, С.Е. Якуш, А.В. Петросян // Ядерная энергетика. – 2005. – № 3. – С. 47–59.
3. Соколов Е.Я., Зингер Н.М. Струйные аппараты. – М.: Энергоатомиздат. 1989. – 352 с.
4. Bezrukov Y.A., Logvinov S.A., Melikhov V.I., Melikhov O.I., Yakush S.E. Experimental and Numerical Study of the Boron Dilution Incident in VVER-1000 Reactor // International Conference Nuclear Energy in Central Europe. – Bled, Slovenia, 2000. – № 807. – P. 72–79.
5. Bezrukov Yu.A., Logvinov S.A., Melikhov V.I., Melikhov O.I., Yakush S.E. Analysis of Boron Dilution in VVER-1000 Reactor // Proceedings of Annual Meeting on Nuclear Technology 2001. – Dresden, Germany, 2001. – P. 117–120.

References

1. Bezrukov Y.A., Logvinov S.A., Melikhov V.I., Melikhov O.I., Yakush S.E. Issledovanie razbavleniya bora v reaktore VVER-1000 // Теплоэнергетика. 2002 no. 5 pp. 22–26.
2. Melikhov O.I., Melikhov V.I., Yakush S.E., Petrosyan A.V. Chislennoe modelirovanie peremeshivaniya potokov s razlichnoi koncentraciei bora kodom REMIX // Yadernaya energetika 2005 no. 3 pp. 47–59.
3. Sokolov E.Y., Zinger N.M. Struinue apparatus Moscow Energoatomizdat 1989 352 p.
4. Bezrukov Yu.A., Logvinov S.A., Melikhov V.I., Melikhov O.I., Yakush S.E. Experimental and Numerical Study of the Boron Dilution Incident in VVER-1000 Reactor // International Conference Nuclear Energy in Central Europe. Bled, Slovenia, 2000. no. 807, pp. 72–79.
5. Bezrukov Yu.A., Logvinov S.A., Melikhov V.I., Melikhov O.I., Yakush S.E. Analysis of Boron Dilution in VVER-1000 Reactor // Proceedings of Annual Meeting on Nuclear Technology 2001. Dresden, Germany, 2001. pp. 117–120.

Рецензенты:

Кулешов А.А., д.ф.-м.н., главный научный сотрудник Института прикладной математики им. М.В.Келдыша РАН, г. Москва;
Гремячкин В.М., д.ф.-м.н., заведующий лабораторией термогазодинамики и горения ФГУБН «Института проблем механики им. А.Ю. Ишлинского» РАН, г. Москва.

Работа поступила в редакцию 13.11.2012.