

УДК 536.24

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАСХОДНО-НАПОРНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЖЕКТОРА С ТАНГЕНЦИАЛЬНЫМ ПОДВОДОМ ПАССИВНОЙ СРЕДЫ ДЛЯ СИСТЕМЫ АВАРИЙНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ АКТИВНОЙ ЗОНЫ АЭС С ВВЭР

**¹Блинков В.Н., ¹Мелихов В.И., ¹Мелихов О.И., ¹Парфенов Ю.В., ¹Никонов С.М.,
¹Емельянов Д.А., ²Елкин И.В., ²Трубкин Е.И.**

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

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

Статья посвящена экспериментальному исследованию напорно-расходной характеристики эжектора с тангенциальным подводом пассивной среды для системы аварийного охлаждения активной зоны АЭС с ВВЭР. Были сконструированы и изготовлены три уменьшенные модели эжектора с тангенциальным подводом пассивной среды. Масштаб моделей по отношению к натурному эжектору составляет 1:27,7 (по проходным сечениям). В случае равных расходов инжектируемой пассивной среды модели характеризуются различными значениями скорости пассивной воды в патрубках тангенциального подвода. Для характеристики конструкции эжекторов был введен параметр ω_i , равный отношению скорости пассивной среды в тангенциальном подводе при требуемом расходе к радиусу приемной камеры. В экспериментах для всех трех моделей эжектора с тангенциальным подводом наблюдались режимы предельного расхода. Было установлено, что при увеличении параметра ω_i величина предельного расхода уменьшается.

Ключевые слова: эжектор, тангенциальный подвод, АЭС с ВВЭР, САОЗ

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE HEAD-FLOW RATE CHARACTERISTIC OF THE EJECTOR WITH THE TANGENTIAL INJECTION OF THE SUCTION WATER 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.,
¹Emelyanov D.A., ²Elkin I.V., ²Trubkin E.I.**

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

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

The experimental investigation of the head-flow characteristic of the ejector with tangential injection of the suction fluid for emergency core cooling system of the NPP with VVER reactor is presented in the paper. Three diminished models of the ejector with tangential injection of the passive fluid were designed and constructed. The scale of the models is 1:27,7 (according to the cross sections). Models are characterized with different values of the fluid velocities in the suction fluid pipeline in the case of the equal suction fluid flow rates. The parameter ω_i equal to the ratio of the design required suction fluid velocity in the tangential injection pipeline to the radius of the inlet chamber was defined for each model. The regime with the flow rate limitation was observed for all three models of the ejector with the tangential injection of the suction fluid. It was observed, that the increasing of the ω_i leads to the decreasing of the limited flow rate.

Keywords: ejector, tangential injection, NPP with VVER

В новых проектах АЭС с водо-водяным энергетическим реактором (ВВЭР) в системе аварийного и планового расхолаживания первого контура планируется использовать агрегат «насос-эжектор», состоящий из насоса высокого давления и водо-водяного эжектора, устанавливаемого на напорной стороне насоса [1]. В аварийных режимах агрегат «насос-эжектор» должен обеспечить отвод остаточного тепловыделения от активной зоны реактора, подавая охлаждающую воду в первый контур при снижении давления ниже 2 МПа. В режиме планового (штатного) расхолаживания реакторной установки агрегат «насос-эжектор» также должен обеспечить подачу воды при сни-

жении давления ниже 2,0 МПа. Кроме того, агрегат планируется использовать для отвода тепла от отработанного топлива, размещенного в бассейне выдержки.

В [2] были представлены результаты расчетно-экспериментального исследования напорно-расходной характеристики конструкции одноступенчатого эжектора в рамках анализа возможности его использования в САОЗ АЭС с ВВЭР. Экспериментальные исследования показали, что снижение давления на выходе из диффузора эжектора сначала вызывает увеличение расхода инжектируемой воды, однако при некотором значении давления достигается предельное значение расхода среды

и дальнейшее уменьшение давления на выходе из диффузора больше не приводит к возрастанию расхода. При этом анализ результатов исследования, выполненный с помощью инженерной методики [3] и с помощью CFD-кода REMIX, указывал на кавитацию как на причину предельного расхода [4].

Дальнейшие исследования были направлены на увеличение предельного расхода перекачиваемой жидкости. Для этого в ОАО «ЭНИЦ» была разработана и испытана двухступенчатая модель эжектора, выполненная в масштабе 1:20 по проходным сечениям к натурному образцу эжектора. Данный вариант конструкции позволил увеличить предельный расход через эжектор, однако рабочий диапазон давлений на расходно-напорной характеристике двухступенчатого эжектора оказался достаточно узким, что затрудняло использование подобного эжектора в САОЗ АЭС с ВВЭР.

В данной работе представлены результаты экспериментальных исследований эжектора нового варианта конструкции, которая была модифицирована с целью увеличения предельного расхода при сохранении достаточно широкого диапазона рабочих давлений. Увеличение расхода среды эжектором может достигаться за счет использования дополнительно создаваемых центробежных сил при закрутке потока среды [5]. В ОАО ЭНИЦ при участии специалистов НИУ МЭИ была разработана конструкция

эжектора с тангенциальным подводом пассивной среды с целью исследования влияния закрутки потока на расходно-напорную характеристику. В данной работе представлены результаты экспериментального исследования расходно-напорной характеристики эжектора данного варианта конструкции.

Цель работы – экспериментальное исследование расходно-напорной характеристики эжектора с тангенциальным подводом пассивной среды для САОЗ АЭС с ВВЭР.

Материал и методы исследования

В Электрогорском научно-исследовательском центре по безопасности атомных электрических станций (ОАО ЭНИЦ) было проведено экспериментальное исследование расходно-напорной характеристики трех уменьшенных моделей эжектора с тангенциальным подводом пассивной среды в рамках анализа возможности использования подобного эжектора в САОЗ АЭС с ВВЭР. Масштаб моделей составлял 1:27,7 (по проходным сечениям). На рис. 1 представлена схема проточной части первой модели эжектора с тангенциальным подводом пассивной среды, а ее геометрические параметры представлены в таблице. На рис. 2 представлены поперечные разрезы приемной камеры в области подачи пассивной среды для трех моделей эжектора. Модели эжектора отличались лишь конструкцией данного элемента. Диапазон давлений рабочей воды составлял 6,2–7,2 МПа, давление инжектируемой воды 0,14–0,146 МПа, расход рабочей воды ~3,0 кг/с, температура рабочей воды 47–102 °С, температура инжектируемой воды 20–40 °С.

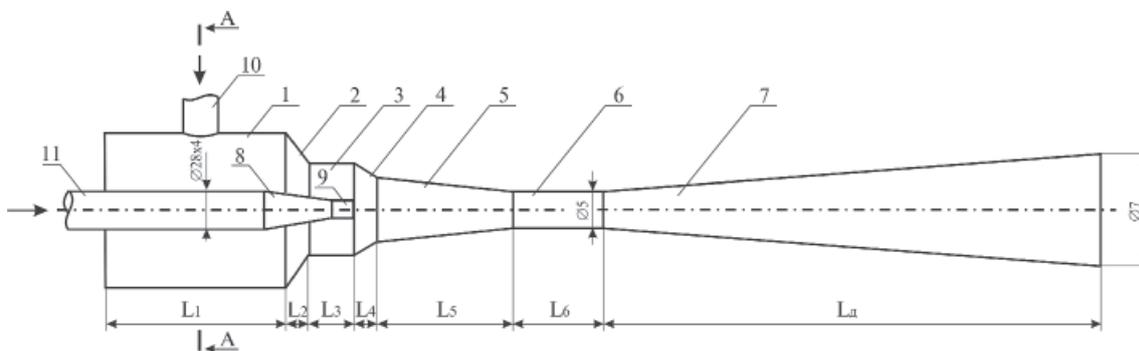


Рис. 1. Общий вид проточной части модели эжектора:

1 – приемная камера; 2, 3 – пассивное сопло (участки 1 и 2); 4, 5, 6 – камера смешения (участки 1, 2 и 3); 7 – диффузор; 8, 9 – рабочее сопло (участки 1 и 2); 10 – подвод пассивной воды; 11 – подвод рабочей среды

При разработке конструкции модели эжектора с тангенциальным подводом планировалось достигнуть расход пассивной среды 6 кг/с. При этом с учетом расхода рабочей воды 3 кг/с при пересчете на натуральный эжектор суммарный расход через эжектор должен был составить ~ 900 т/ч. Модели эжекторов характеризовались угловой скоростью, которая определялась по соотношению

$$\omega_i = \frac{W_i}{R}, \quad (1)$$

где W_i – скорость пассивной воды в патрубках тангенциального подвода в приемной камере, определяемая по требуемому расходу пассивной воды 6 кг/с; R – внутренний радиус приемной камеры; i – номер модели эжектора. Моделям соответствовали следующие угловые скорости:

- модель № 1 – $\omega_1 = 75$ 1/с;
- модель № 2 – $\omega_2 = 143$ 1/с;
- модель № 3 – $\omega_3 = 300$ 1/с.

Геометрические параметры моделей эжектора с тангенциальным подводом пассивной воды

| Геометрический параметр | Размерность | Приемная камера | Пассивное сопло | | | Камера смешения | | | Диффузор | Рабочее сопло | |
|-------------------------|-------------|-----------------|-----------------|-------------|-------------|-----------------|-------------|-------------|----------|---------------|--|
| | | | 1-й участок | 2-й участок | 1-й участок | 2-й участок | 3-й участок | 1-й участок | | 2-й участок | |
| Двухход | мм | 80 | 80 | 40 | 40 | 30 | 15,2 | 15,2 | 20 | 6 | |
| Двухход | мм | 80 | 40 | 40 | 30 | 15,2 | 15,2 | 64 | 6 | 6 | |
| Угол раскрытия | град. | 0 | 126,8 | 0 | 54 | 14 | 0 | 10 | 26 | 0 | |
| Li | мм | 166 | 10 | 20 | 9,8 | 60 | 50 | 270 | 30 | 10 | |

Результаты исследования и их обсуждение

На рис. 2 представлены экспериментальные расходно-напорные характеристики для различных вариантов конструкции эжектора, полученные в ОАО ЭНИЦ.

Из рис. 3 видно, что для всех вариантов конструкции наблюдаются режимы предельного расхода. По-видимому, это связано с кавитационными процессами в тракте эжектора, возникающими при достижении соответствующего расхода перекачиваемой воды.

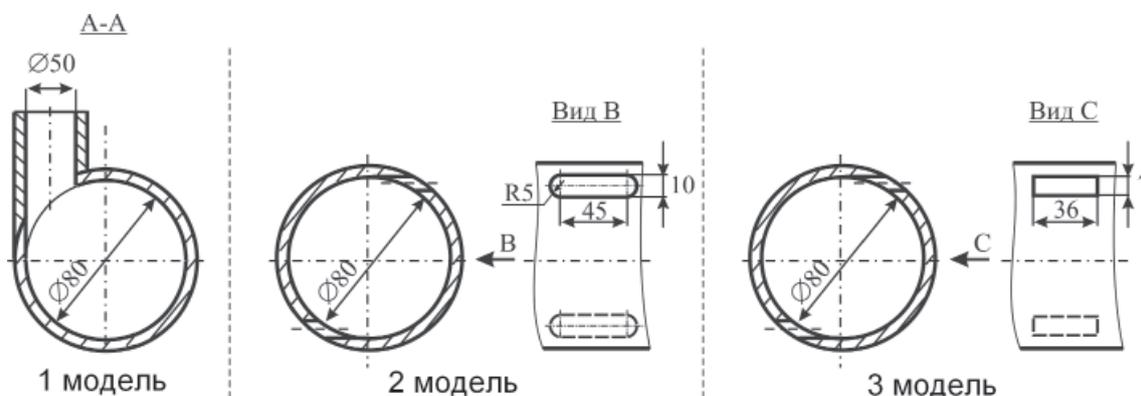


Рис. 2. Поперечный разрез приемной камеры в области подвода пассивной среды для трех моделей эжектора

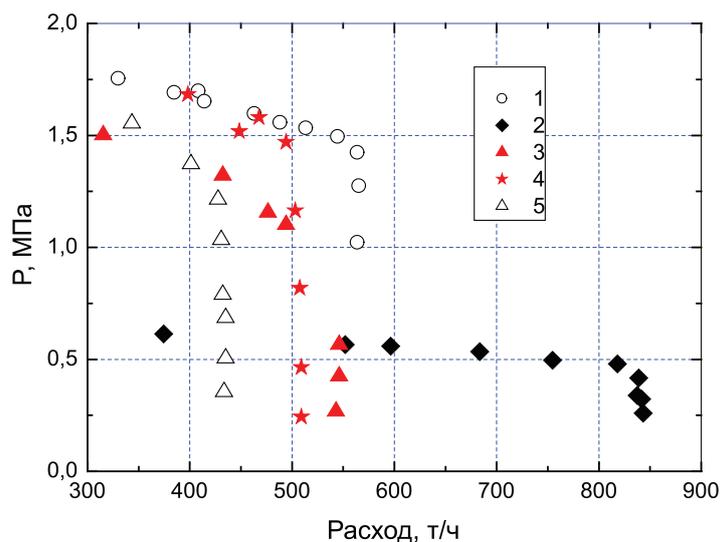


Рис. 3. Зависимость давления на выходе из эжектора от расхода перекачиваемой среды: 1 – одноступенчатый эжектор; 2 – характеристика модели двухступенчатного эжектора в пересчете на натурный эжектор; 3 – модель эжектора с танг. подводом № 1 в пересчете на натурный эжектор; 4 – модель эжектора с танг. подводом № 2 в пересчете на натурный эжектор; 5 – модель эжектора с танг. подводом № 3 в пересчете на натурный эжектор

При увеличении параметра ω_i , характеризующего модели эжектора с тангенсиальным подводом, величина предельного расхода уменьшалась. Предельный расход через эжектор с учетом пересчета на натуральный объект для модели № 1 ($\omega_i = 75$ л/с) составил ~ 540 т/ч, для модели № 2 ~ 510 т/ч, а для модели № 3 ($\omega_i = 300$ л/с) ~ 430 т/ч.

Характерные величины давления на выходе из эжектора при расходах, меньших предельного, для модели № 2 ($\omega_i = 143$ л/с) были больше, чем для моделей № 1 и 3.

Величины предельных расходов через модели эжекторов с тангенсиальным подводом были меньше, чем предельные расходы через одноступенчатый эжектор и модель двухступенчатого эжектора.

Выводы

Выполнено экспериментальное исследование влияния тангенсиального подвода пассивной среды на напорно-расходную характеристику эжектора.

Сконструированы и изготовлены три уменьшенные модели эжектора с тангенсиальным подводом пассивной среды. Масштаб моделей по отношению к натурному эжектору составляет 1:27,7 (по проходным сечениям). В случае равных расходов инжектируемой пассивной среды модели характеризуются различными значениями скорости пассивной воды в патрубках тангенсиального подвода. Для характеристики конструкции эжекторов был введен параметр ω_i , равный отношению скорости пассивной среды в тангенсиальном подводе при требуемом расходе к радиусу приемной камеры.

В экспериментах для всех трех моделей эжектора с тангенсиальным подводом наблюдались режимы предельного расхода. Было установлено, что при увеличении параметра ω_i , величина предельного расхода уменьшается.

Значения предельного расхода для всех трех моделей эжектора с тангенсиальным подводом меньше, чем для одноступенчатого эжектора и модели двухступенчатого эжектора.

Работа выполнена при финансировании Российским фондом фундаментальных исследований (проект РФФИ № 11-08-00410-а) и 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. О новых проектах реакторных установок ВВЭР на современном этапе развития атомной энергетики / С.В. Рыжов, В.А. Мохов, А.К. Подшибякин, И.Г. Щекин, А.Н. Чуркин, В.И. Кржижановский, А.Е. Четвериков, С.В. Шмелев, О.В. Титов, Д.А. Ануфриев // Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР: 6-я Международная научно-техническая конференция, ОКБ «Гидропресс», Россия. – Подольск, 26–29 Мая, 2009.
2. Расчетно-экспериментальное исследование напорно-расходной характеристики эжектора для системы аварийного охлаждения активной зоны АЭС с ВВЭР / В.Н. Блинков, В.И. Мелихов, О.И. Мелихов, Ю.В. Парфенов, С.М. Никонин, И.В. Елкин, Е.И. Трубкин, С.Е. Якуш // Фундаментальные исследования. – 2012. – № 11 (Ч. 5). – С. 1172–1175.
3. Соколов Е.Я., Зингер Н.М. Струйные аппараты. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 352 с.
4. 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.
5. Вихревой эжектор: патент RU 2162968 C2, патентообладатель: Курский государственный технический университет, дата начала действия патента: 22.03.1999.

References

1. S.V. Ruzov, V.A. Mokhov, A.K. Podshibyakin, I.G. Shekin, A.N. Churkin, V.I. Krzizanovskii, A.E. Chetverikov, S.V. Shmelev, O.V. Titov, D.A. Anufriev O novuh proektah reaktornuh ustanovok VVER na sovremennom etape razvitiya atomnoi energitiki // 6-ya Mezhdunarodnaya nauchno-tehnicheskaya konferenciya «Obespechenie bezopasnosti AES s VVER», ОКБ «Gidropress», Rossiya, Podolsk, 26–29 Maya 2009
2. V.N.Blinkov, V.I. Melikhov, O.I. Melikhov, Y.V. Parfenov, S.M.Nikonov, I.V. Elkin, E.I. Trubkin, S.E.Yakush. Raschetno-experimentalnoe issledovanie naporno-rashodnoi harakteristiki ejectora dlya sistemu avariinogo ohlazdeniya aktivnoi zonu AES s VVER // Fundamentalnue issledovaniya, 2012, no. 11 (chast 5), pp. 1172–1175.
3. Sokolov E.Y., Zinger N.M. Struinue apparatus. Moscow. Energoatomizdat, 1989. 352 p.
4. Melikhov O.I., Melikhov V.I., Yakush S.E., Petrosyan A.V. Chislennoe modelirovanie peremeshivania potokov s razlichnoi koncentraciei bora kodom REMIX // Yadernaya energetika. 2005. no. 3. 47–59 pp.
5. Patent RU 2162968 C2 «Vihrevoi ejector», patentoobladatel: Kurskii gosudarstvennui tehniceskii universitet, data nachala deistviya patenta: 22.03.1999.

Рецензенты:

Гашенко В.А., д.т.н., зам. директора по научной работе, начальник Управления НИР и НИОКР в области водной химии ОАО «Электрогорский научно-исследовательский центр по безопасности атомных электростанций», Государственная корпорация по атомной энергии «Росатом», г. Электрогорск;

Якуш С.Е., д.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник лаборатории термогазодинамики и горения Института проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, г. Москва.

Работа поступила в редакцию 16.09.2013.