

УДК 621.183

**М. Г. УХАНОВА**, инженер 1 кат. ОАО «НПО ЦКТИ», Санкт-Петербург, Россия;  
**Н. Н. ТРИФОНОВ**, канд. техн. наук, доц.; зав. лаб. ОАО «НПО ЦКТИ»,  
Санкт-Петербург, Россия;  
**Ф. А. СВЯТКИН**, инженер-конструктор 1 кат. ОАО «НПО ЦКТИ»,  
Санкт-Петербург, Россия;  
**С. Б. ЕСИН**, инженер-конструктор 1 кат. ОАО «НПО ЦКТИ»,  
Санкт-Петербург, Россия;  
**Е. Б. ГРИГОРЬЕВА**, инженер-конструктор 3 кат. ОАО «НПО ЦКТИ»,  
Санкт-Петербург, Россия

### **ОСОБЕННОСТИ МЕТОДИКИ РАСЧЕТА РЕГУЛИРУЮЩИХ КЛАПАНОВ, РАБОТАЮЩИХ НА ВСКИПАЮЩЕЙ ВОДЕ, ДЛЯ ПОДОГРЕВАТЕЛЕЙ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ И ЗАРУБЕЖНЫХ АЭС**

В статье приведено описание предложенной ОАО «НПО ЦКТИ» методики расчета клапанов, регулирующих уровень в теплообменных аппаратах, и её особенности. Приведено описание предложенных конструкций новых регулирующих клапанов в сравнении с эксплуатируемыми в настоящее время, а также результаты расчетов технических характеристик клапанов и их влияние на работу подогревателей высокого давления камерного типа.

**Ключевые слова:** регулирующий клапан, подогреватель высокого давления, АЭС, методика расчета, дросселирование, вскипание.

#### **Введение**

Регулирующие клапаны (РК) подогревателей системы регенерации предназначены для регулирования уровня конденсата греющего пара в паровом пространстве корпуса подогревателей высокого давления (ПВД) путем частичного открытия или закрытия клапана в статических и динамических режимах работы турбоустановки.

Основанием для конструирования регулирующих клапанов служат данные гидравлического расчета. РК подогревателей высокого давления предназначены для регулирования уровня конденсата греющего пара в паровом пространстве корпуса ПВД путем открытия или закрытия клапана.

Особенностью РК является работа на вскипающем потоке, что приводит к интенсивному эрозионному износу проточной части и корпуса клапана, а также сопровождается кавитацией, шумом, вибрацией, которые снижают долговечность и надежность арматуры.

#### **Анализ основных достижений и литературы**

Для предотвращения вышеуказанных недостатков предложено двухступенчатое дросселирование вскипающего потока в конструкции РК: в первой ступени дросселируется переохлажденный конденсат – однофазная среда, а во второй – двухфазный поток. Следовательно, гидравлический расчет РК должен проводиться отдельно для каждой ступени.

Для однофазной среды в основе гидравлического расчета РК лежит уравнение расхода несжимаемой жидкости [1]

$$G = \mu F \sqrt{2g\Delta P\rho}, \quad (1)$$

---

© М.Г. Уханова, Н.Н. Трифонов, Ф.А. Святкин, С.Б. Есин, Е.Б. Григорьева, 2014

где  $\mu$  – коэффициент расхода;  $F$  – площадь проходного сечения клапана;  $\Delta P$  – перепад давлений;  $g$  – ускорение свободного падения;  $\rho$  – плотность среды.

Для двухфазной среды формула для вычисления расхода выглядит иначе [1]

$$G = \mu F \sqrt{2 \frac{k}{k-1} P_1 \rho_1 \left( \varepsilon^{\frac{2}{k}} - \varepsilon^{\frac{k+1}{k}} \right)}, \quad (2)$$

где  $k$  – показатель адиабаты;  $\varepsilon$  – отношение давлений.

#### Цель исследования, постановка задачи

Особенностью расчета расхода двухфазной среды является вычисление показателя адиабаты. На сегодняшний день существуют различные уравнения для определения  $k$  двухфазной смеси [1–5]. К настоящему моменту отсутствуют экспериментальные данные о достоверности этих уравнений при параметрах работы РК ПВД. ОАО «НПО ЦКТИ» предложена методика, использующая все уравнения для вычисления показателя адиабаты двухфазного потока, и из полученных значений выбирается наихудшее для данных условий эксплуатации, по которому и ведется дальнейший расчет.

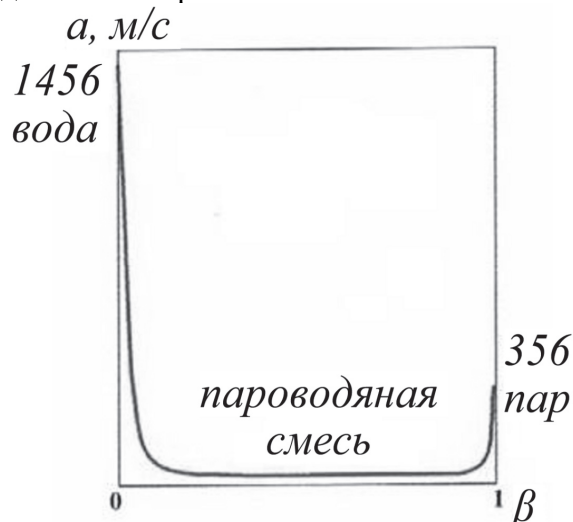


Рис. 1 – Зависимость скорости звука от объемного соотношения фаз в смеси

Скорость двухфазного потока в клапане может достигать локальной скорости звука, которая зависит от объемного соотношения фаз в смеси,  $\beta$ , и может достигать 10–20 м/с (рис. 1) [2], при этом наступает критическое истечение. Из термодинамики известно, что при критическом истечении невозможно регулировать расход [1].

Поэтому в заключение расчета обязательно проводится проверка второй ступени РК на отсутствие критического истечения. Если же оно присутствует, то необходимо выполнить перераспределение давления на ступенях клапана.

#### Материалы исследования

Необходимым условием устойчивого поддержания уровня среды в теплообменном аппарате в статических и динамических режимах работы является линейная зависимость угла поворота золотника,  $\varphi$ , или хода штока,  $h$ , от расхода. В зависимости от режима работы клапана строится график функции изменения расхода, коэффициента расхода и перепада давлений на клапане от угла поворота или хода штока, характерный вид которого представлен на рис. 2.

Для получения линейной характеристики величина площади проходного сечения клапана разбивается на  $n$  элементов в зависимости от угла поворота или хода штока, для каждого участка. С помощью графика определяем площадь и строим профиль проходного сечения первой ступени дросселя РК. Таким образом, обеспечивается линейная характеристика клапана.

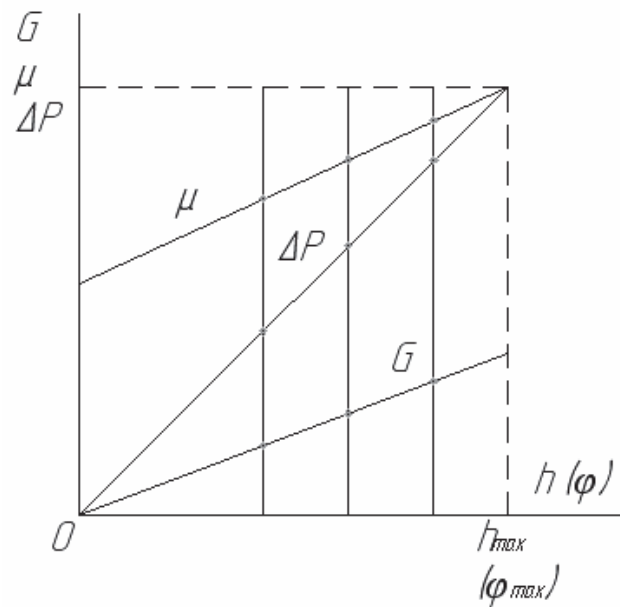


Рис. 2 – График функции изменения расхода, коэффициента расхода и перепада давлений на клапане от угла поворота

Вторая ступень дросселирования в РК рассчитывается с учетом вскипания потока.

#### Результаты исследования

ОАО «НПО ЦКТИ» разработаны РК поворотного типа для вскипающей воды (рис. 3) [6]. РК конструктивно выполнены в виде тройника с патрубками подвода и отвода воды и крышкой, на которой установлен привод оборотного типа. В корпусе расположена гильза из коррозионно-стойкой стали, внутри гильзы – золотник. В цилиндре золотника выполнены два окна, направленных друг против друга так, что при повороте золотника площади окон увеличиваются или уменьшаются одновременно. Для исключения эрозии в клапане золотник снабжён специальным кольцом.

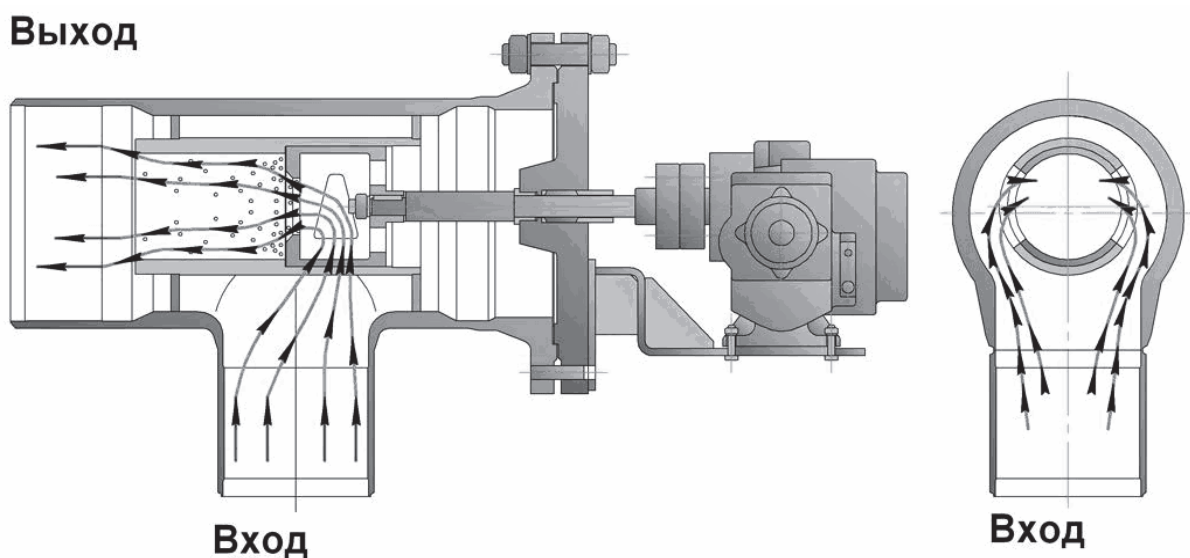


Рис. 3 – РК поворотного типа для ПВД

Опыт эксплуатации и проведенные испытания двенадцати таких клапанов на блоках 1 и 2 Тяньваньской АЭС (Китай), а также АЭС «Бушер» (Иран) подтвердили хорошее качество регулирования в статических и динамических режимах работы блока, что обеспечивает удержание уровня в диапазоне  $\pm 100$  мм. Регулировочная характеристика близка к линейной в диапазоне от 5 до 100 %. Осмотр оборудования после 4 лет эксплуатации не выявил эрозионного износа элементов проточной части клапанов. Обнаруженные задиры в золотнике клапана при пуско-наладочных работах были устранены при плановом осмотре. Даны рекомендации по их исключению.

С целью исключения задиrow и увеличенных зазоров в золотниках ОАО «НПО ЦКТИ» разработаны РК седельного типа для вскипающей воды со встроенным прямоходным электроприводом, с линейной регулировочной характеристикой. Это обеспечивает высокое качество регулирования и надежность.

Клапаны конструктивно выполнены в виде тройника с патрубками подвода и отвода воды и крышкой, которая при помощи фланцевого разъема соединена с корпусом (рис. 4).

**Выход**

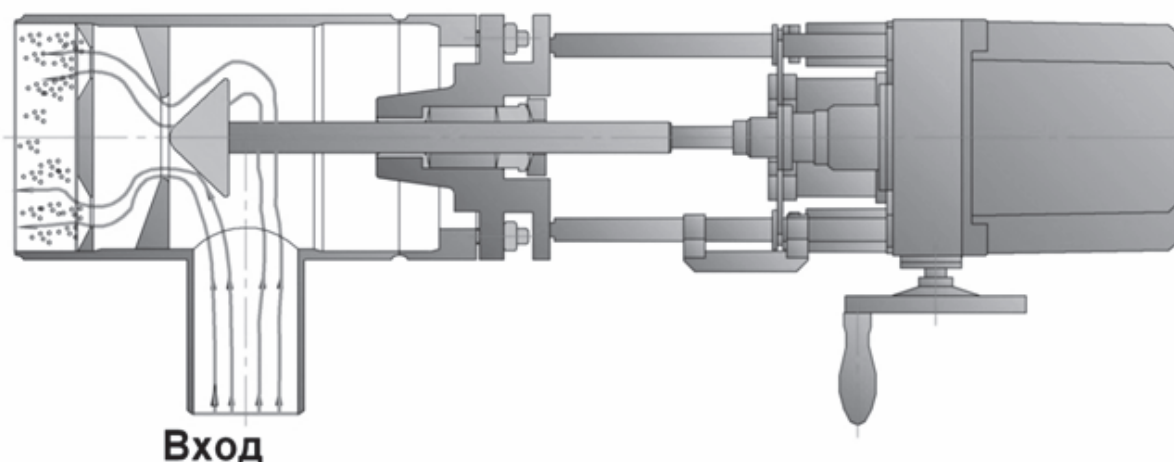


Рис. 4 – РК седельного типа для ПВД

В корпусе клапана расположен регулирующий орган, который состоит из штока с профилированным плунжером.

Клапан управляется встроенным электроприводом. При поступательном движении штока изменяется зазор между седлом и профилированным концом штока (площадь проходного сечения клапана), в результате чего происходит регулирование расхода среды через клапан.

Основная часть перепада давления клапана срабатывается на узле «седло-профилированный плунжер».

Для исключения эрозии в выходном сечении клапана установлено специальное кольцо из коррозионно-стойкой стали с одним или несколькими отверстиями – дроссельное устройство. Это позволяет перенести процесс вскипания на выход из клапана за счет перераспределения перепада давления в клапане и уменьшает скорость потока в рабочем узле.

### Выводы

1) Клапаны, регулирующие расход среды, близкой к состоянию насыщения, следует рассчитывать по методике двухступенчатого дросселирования для исключения вскипания среды в регулирующем органе с последующим эрозионным износом проточной части регулирующего клапана.

2) Во избежание запираания потока в регулирующем органе необходимо выполнять проверку результатов расчета регулирующего клапана на попадание в зону критического истечения вскипающего потока.

**Список литературы:** 1. Благов, Э. Е. Дроссельно-регулирующая арматура в энергетике [Текст] / Э. Е. Благов, Б. Я. Ивницкий. – М.: Энергия, 1974. – 264 с. 2. Фисенко, В. В. Критические двухфазные потоки [Текст] / В. В. Фисенко. – М.: Атомиздат, 1978. – 160 с. 3. Белоконь, Н. И. Термодинамика [Текст] / Н. И. Белоконь. – М.; Л.: Госэнергоиздат, 1954. – 416 с. 4. Новиков, И. И. Показатель адиабаты насыщенного и влажного пара [Текст] / И. И. Новиков // Докл. АН СССР. Новая сер. – 1948. – Т. 59, № 8. – С. 1425. 5. Сычев, В. В. Новое уравнение для показателя адиабаты влажного пара [Текст] / В. В. Сычев // Теплоэнергетика. – 1961. – № 3. – С. 67. 6. Пат. № 2179330 Российская Федерация, МПК G05D7/00. Регулирующий клапан / Трифонов Н. Н., Лысенкова Н. Ю., Коваленко Е. В., Крючкова И. В.; Заявитель и патентообладатель НПО ЦКТИ. – № 96105876/09; заявл. 28.03.1996; опубл. 10.02.2002, Бюл. № 4. – 5 с.

**Bibliography (transliterated):** 1. Blagov, Je. E., and B. Ja. Ivnickij. *Drossel'no-regulirujushhaja armatura v jenergetike*. Moscow: Jenergija, 1974. Print. 2. Fisenko, V. V. *Kriticheskie dvuhfaznye potoki*. Moscow: Atomizdat, 1978. Print. 3. Belokon', N. I. *Termodinamika*. – Moscow: Gosjenergoizdat, 1954. Print. 4. Novikov, I. I. "Pokazatel' adiabaty nasyshhenogo i vlazhnogo para." *Dokl. AN SSSR. Novaja ser.* 59.8 (1948): 1425. Print. 5. Sychev, V. V. "Novoe uravnenie dlja pokazatelja adiabaty vlazhnogo para." *Teplojenergetika* 3 (1961): 67. Print. 6. Trifonov, N. N., et al. "Regulirujushhij klapan." Ru Patent 2179330 (MPK G05D7/00) 10 February 2002.

Поступила (received) 17.02.14