

Ю.А. Кузма-Кичта, А.С. Седлов, Е.О. Коньков, А.В. Лавриков

Московский энергетический институт (технический университет), Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ПРИ КИПЕНИИ ВОДНЫХ РАСТВОРОВ В КАНАЛЕ

АННОТАЦИЯ

Проведено исследование гидравлического сопротивления при кипении водных растворов в трубе.

1. ВВЕДЕНИЕ

Для подготовки добавочной воды на ТЭС применяется термический метод обессоливания на базе испарителей как отдельных, так и объединённых в испарительные установки. Дистиллят, вырабатываемый на испарительных установках, используется для питания котлов сверхкритического давления. При этом испарительные установки одновременно выполняют две функции: подготовку добавочной воды основного контура и концентрирование сточных вод. Возможности испарительных установок – маневренность, автономность и относительная простота эксплуатации – создают предпосылки для дальнейшего развития термического метода водо-подготовки.

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В настоящее время испарительные установки строятся преимущественно на базе испарителей естественной циркуляции типа «И». Методика расчёта испарителя естественной циркуляции была разработана на кафедре ТЭС МЭИ под руководством Л.С. Стермана [1]. В соответствии с этой методикой, определяющим гидравлическим параметром испарителя считается скорость циркуляции, которая зависит от соотношения движущего напора и потерь контура циркуляции:

$$w_0 = f(\Delta P_{\text{пот}}, \Delta P_{\text{дв}}). \quad (1)$$

В качестве определяющего теплового параметра используется разность температур насыщения греющего и вторичного пара:

$$\Delta t = f(t_{\text{гр}}, t_{\text{вт}}). \quad (2)$$

Однако полученные по методике [1] коэффициенты теплопередачи существенно отличаются от действительных, если испарители работают на воде закритической минерализации.

В 2004 году было проведено исследование на третьем корпусе многоступенчатой испарительной установки (МИУ) Саранской ТЭЦ-2 [2]. Эксперимент состоял из двух серий: на маломинерализованных средах (до 4 г/л) и на высококонцентрированных растворах (более 8 г/л). При работе испарителя на концентрате докритической минерализации в опускной щели возникает устойчивое нисходящее

движение среды со скоростью 0.8–1.0 м/с; при закритической минерализации циркуляция неустойчивая, в опускной щели 70% времени наблюдается восходящее движение среды и 30% времени – нисходящее, т.е. скорость движения среды имеет более низкие значения.

Для этих условий проведены исследования [3–5] граничного паросодержания, при котором происходит переход к области ухудшенного теплообмена, в лаборатории «ПТиЭ» каф. ТЭС МЭИ совместно с кафедрой Инженерной теплофизики (ИТФ) МЭИ под руководством профессора Ю.А. Кузма-Кичты.

Граничное паросодержание, при котором начинается переход к участку ухудшенного теплообмена при закритической минерализации трёхкомпонентного водного раствора, может быть определено по зависимостям, полученным Р.В. Агаповым [5]:

$$X^* = 1 - 4,32C_n^{0.97}, \text{ в диапазоне } 0 \leq C_n \leq 0.08,$$

$$X^* = 1 - 0,17C_n^{-0.32}, \text{ в диапазоне } 0.08 \leq C_n \leq 0.2, \quad (3)$$

$$\text{где } C_n = \text{Fr} \left(\frac{\rho''}{\rho'} \right)^{0.55} \left(1 + \frac{C(\text{Na}_2\text{SO}_4)}{C^*} \right)^{0.1} \left(1 + \frac{C(\text{NaOH})}{C^{**}} \right)^{0.05},$$

$C(\text{Na}_2\text{SO}_4)$ и $C(\text{NaOH})$ – концентрации сульфата натрия и едкого натра соответственно; C^* – критическая концентрация Na_2SO_4 , $C^* = 5$ г/кг; C^{**} – критическая концентрация NaOH , $C^{**} = 1$ г/кг; Fr – число Фруда,

$$\text{Fr} = \frac{(\rho w)^2}{(\rho'')^2 g \sqrt{\sigma / (g(\rho' - \rho''))}}.$$

Авторы работ [3–5] Ю.А. Шконди, Д.В. Бужков и Р.В. Агапов за цикл работ в области испарительной техники удостоены Государственной премии для молодых учёных.

Также на МИУ Саранской ТЭЦ-2 В.А. Васиным [6] были исследованы теплогидравлические режимы испарителя. МИУ представляет собой пять испарителей, соединённых последовательно по пару и параллельно по питательной воде. Предложенная В.А. Васиным модель «частичного разрыва» контура естественной циркуляции предполагает, что истинный уровень концентрата в опускной щели должен быть ниже верхней трубной доски. В соответствии с моделью «частичного разрыва» В.А. Васиным было предложено дополнить методику расчёта [1] эмпирической зависимостью перепада давления на греющую секцию от режимных параметров.

$$\delta P_{\text{Гс}} = \frac{\Delta P_{\text{Гс}}}{g \rho' H_{\text{Гс}}} = 1 - 30.5 \left(\rho'' w_{\text{ко}}'' \right)^{1.81} P_{\text{ВТ}}^{-0.27} \times \\ \times \left(H_{\text{Гс}} + h_{\text{Гс}} \right)^{-4.19}, \quad (4)$$

где $P_{\text{ВТ}}$ – давление вторичного пара испарителя 1,6–5,5 бар; $h_{\text{Гс}}$ – весовой уровень концентрата над греющей секцией испарителя 0,3–0,7 м; $\rho'' w_{\text{ко}}''$ – приведенная массовая скорость пара на выходе из труб греющей секции испарителя 0,7–3,3 кг/(м²·К).

Зависимость (4) справедлива только для испарителя И-600.

На основании проведенных экспериментов разработана методология расчёта испарителя, работающего на высокоминерализованной среде [6]. В этом случае можно воспользоваться условием гидростатического равновесия двух столбов жидкости: в трубах греющей секции и опускной щели. В качестве определяющего теплового параметра используется средний температурный напор по высоте греющей секции испарителя с учётом гидростатической, гидравлической и физико-химической депрессии.

$$\Delta t = f \left(t_{\text{Гр}}, t_{\text{ВТ}}, \Delta t_{\text{Гидростат}}, \Delta t_{\text{Гидравл}}, \Delta t_{\text{Ф-Х}} \right). \quad (5)$$

В работе [2, 8] измерена скорость всплытия паровых пузырей в зависимости от солевого содержания (рис. 1), предложены расчётные рекомендации и проведено сопоставление коэффициентов теплопередачи согласно расчёту и эксперименту.

$$w_{\text{Пуз}} = 0,275 - 0,05S, \text{ для } S = 0-20 \text{ г/кг}; \\ w_{\text{Пуз}} = 0,175, \text{ для } S = 20-90 \text{ г/кг}; \\ w_{\text{Пуз}} = 0,175 + 0,00714(S - 90), \text{ для } S = 90-160 \text{ г/кг}.$$

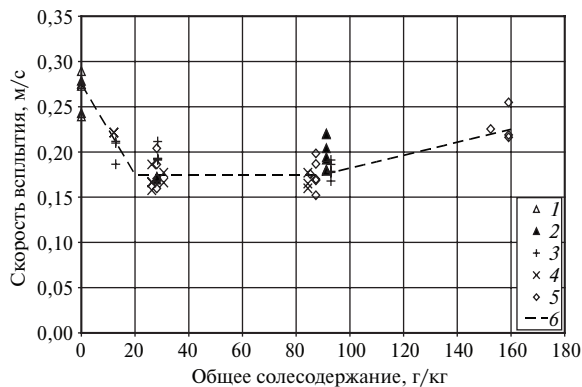


Рис. 1. Зависимость скорости всплытия от солевого содержания растворов [6]: 1 – дистиллят; 2 – 1-й модельный раствор; 3 – 2-й модельный раствор; 4 – 3-й модельный раствор; 5 – реальный раствор (продувка); 6 – предложенные зависимости [2]

Для расчёта гидравлического режима испарителя при закритической минерализации концентрата необходимо знать паросодержание в опускной щели и гидравлическое сопротивление для водных растворов. В [8] получены данные по гидравлическому сопротивлению для водных растворов. В настоящее время в лаборатории «ПТИЭ» кафедрой ТЭС со-

вместно с кафедрой ИТФ проводится исследование гидравлического сопротивления водных растворов при кипении в трубе и разрабатывается методика теплогидравлического расчёта испарителей для случая закритической минерализации концентрата, которая позволит усовершенствовать используемые аппараты и, в конечном итоге, повысить эффективность термической водоподготовки ТЭС.

Исследование гидравлического сопротивления при кипении водных растворов проводится на модернизированном стенде (рис. 2), использованном ранее в работах [3–5]. Падение давления на рабочем участке измеряется с помощью дифференциальных датчиков давления «Сапфир 22-ДД», а расход среды – датчиком «Метран».

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Автоматизированный экспериментальный стенд (рис. 2) представляет собой замкнутый циркуляционный контур, все элементы которого изготовлены из нержавеющей стали X18H10T. Установка обеспечивает проведение измерений в диапазонах давлений 0,1–7 МПа, массовых скоростей 10–650 кг/(м²·с), тепловых нагрузок до 1,5 МВт/м².

Рабочий участок представляет собой трубу с технически гладкой поверхностью из стали X18H10T, с внутренним диаметром 6,89 мм и толщиной стенки 0,55 мм. Обогреваемая длина трубы составила 1775 мм.

Расход в контуре создается высоконапорным насосом-дозатором НД 100/250 с переменной производительностью. Теплоноситель (раствор сульфата натрия в воде) из бака 1 проходит последовательно через фильтр 2, насос 3, ресивер 4, дроссельный вентиль 5, расходомер 6, рабочий участок 7 и холодильник 10. Ресивер и дроссельный вентиль служат

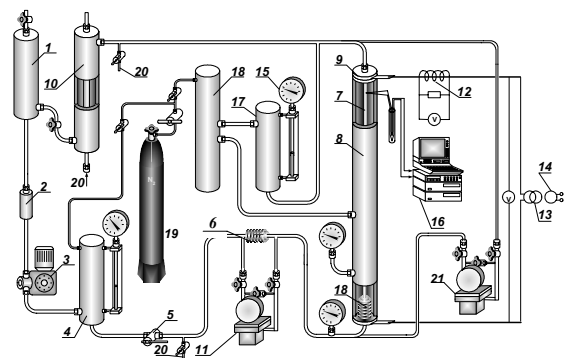


Рис. 2. Схема экспериментальной установки: 1 – бак; 2 – фильтр; 3 – насос; 4 – ресивер; 5 – дроссельный вентиль; 6 – расходомер; 7 – рабочий участок; 8 – защитный кожух; 9 – электроизолирующий фланец; 10 – холодильник; 11 – дифманометр «Метран»; 12 – измерительный трансформатор ОСУ-100; 13 – низковольтный трансформатор АСУ-100; 14 – автотрансформатор АОМК-100; 15 – манометр; 16 – измерительно-вычислительный комплекс на базе аппаратуры HEWLETT-PACKARD; 17 – разгрузочная емкость; 18 – демпфирующая емкость; 19 – баллон с инертным газом; 20 – точки отбора проб; 21 – дифманометр «Сапфир 22ДД»

для сглаживания пульсаций расхода теплоносителя и давления. Резервуар частично заполнен водным раствором Na_2SO_4 , степень заполнения контролируется по уровню. В свободный объем подается газ из баллона 19. Расход теплоносителя в контуре измеряется с помощью спиральной трубки, перепад давления на котором регистрируется дифманометром «Метран» 11. Обогрев рабочего участка осуществляется путем непосредственного пропускания переменного тока от низковольтного трансформатора ОСУ-100 13, регулирование нагрузки которого осуществляется с помощью автотрансформатора АОМК-100 14. Располагаемая электрическая мощность стенда составляет 125 кВт. На входе и выходе из рабочего участка измеряются давление (ИПДЦ-89010) 16 и температура потока (хромель-алюмелевые термопары).

Для разгрузки от давления канал помещен в толстостенный кожух 8. Благодаря тому, что канал и кожух связаны между собой через разгрузочную 17 и демпфирующую емкость 18, в них поддерживается одинаковое давление. При работе установки в емкости 17, 18 подается инертный газ из баллона 19. Степень заполнения разгрузочной емкости определяется по уровню водомерного стекла. Холодильник 10 представляет собой теплообменник типа труба в трубе, охлаждаемый водопроводной водой. При проведении экспериментов путем отбора проб измерялась концентрация раствора сульфата натрия в начале и в конце каждого опыта. Для измерения концентрации двухкомпонентного водного раствора Na_2SO_4 до расходомерной спиральной трубки и после холодильника предусмотрены пробоотборные вентили 20, 21. Регистрация данных измерений и управление экспериментом осуществляется с помощью ИБК 16 на базе аппаратуры фирмы HEWLETT-PACKARD с максимальной скоростью опроса 21 измерение в секунду и разрешающей способностью 1 мкВ.

В работе получены данные по гидравлическому сопротивлению при кипении двухкомпонентных водных растворов Na_2SO_4 .

В целях сопоставления расчетных и опытных данных, а также для проверки системы измерения была проведена серия экспериментов на дистилляте. Полученные данные для воды совпадают с расчетными по [1]:

$$\Delta P = \Delta P_{\text{нив}} + \Delta P_{\text{тр}} + \Delta P_{\text{м.с}} + \Delta P_{\text{уск}}, \quad (7)$$

где

$$\Delta P_{\text{нив}} = [\bar{\varphi}\rho'' + (1 - \bar{\varphi})\rho']gl,$$

$$\Delta P_{\text{тр}} = \zeta \frac{\rho' \omega_0^2}{2} \frac{l}{d} [1 + \psi x (\frac{\rho'}{\rho''} - 1)],$$

$$\Delta P_{\text{уск}} = (\rho' \omega_0)^2 (y_2 - y_1),$$

$\Delta P_{\text{м.с}}$ определялось экспериментально для воды.

На рис. 3 представлены экспериментальные данные по гидравлическому сопротивлению для водных растворов Na_2SO_4 различных концентраций

при $w=0.19$ м/с. С ростом концентрации раствора до 10 г/л отмечен рост ΔP до 30%.

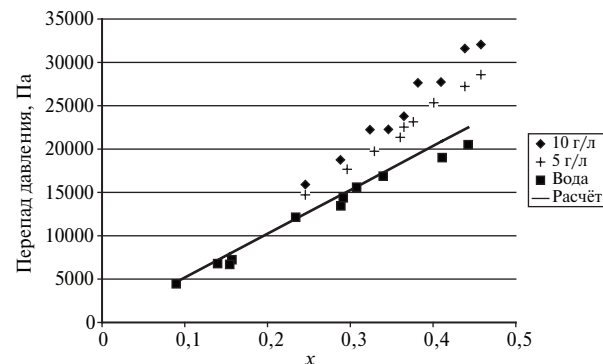


Рис. 3. Зависимость перепада давления от массового паросодержания для водного раствора Na_2SO_4 при различных концентрациях, $w=0.19$ м/с: 1 – данные для воды; 2 – данные для раствора Na_2SO_4 , $c = 5$ г/л; 3 – данные для раствора Na_2SO_4 , $c = 10$ г/л; линия – расчёт согласно [1]

При концентрации водного раствора Na_2SO_4 5 г/л получены данные по гидравлическому сопротивлению при различных скоростях (рис. 4). Установлено, что при различных скоростях движения водного раствора гидравлическое сопротивление в канале также повышается.

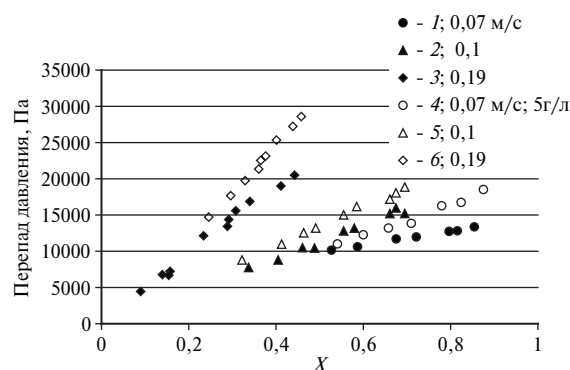


Рис. 4. Зависимость перепада давления в канале при различных скоростях (0.07 м/с, 0.1 м/с, 0.19 м/с) для концентрации Na_2SO_4 $c = 5$ г/л от массового паросодержания: 1–3 – данные для воды; 4–6 – данные для раствора Na_2SO_4 $c = 5$ г/л; линии – расчёт согласно [1]

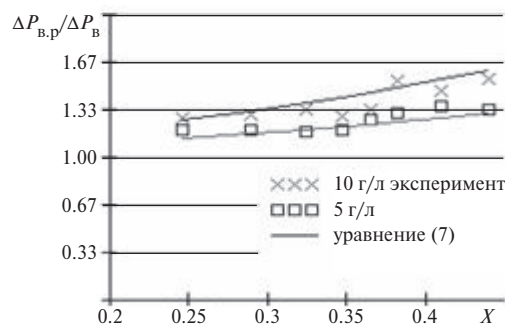


Рис. 5. Зависимость относительного перепада давления в трубе от паросодержания при различных концентрациях Na_2SO_4 и скорости 0.19 м/с

На рис. 5 представлены полученные опытные данные в виде относительного перепада давления в трубе от паросодержания. Данные описываются с разбросом до 15% уравнением следующего вида:

$$\frac{\Delta P_{в.р}}{\Delta P_{в}} = 1 + C(0,01 + 0,508X^2 w^{0,4}), \quad (8)$$

где C – концентрация Na_2SO_4 .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Получены данные по гидравлическому сопротивлению при кипении в канале раствора Na_2SO_4 в диапазоне $x=0,1 \div 0,87$ при концентрациях до 10 г/л для $w=0,07 \div 0,19$.

Обнаружено, что с ростом концентрации гидравлическое сопротивление при кипении водных растворов в трубе возрастает до 30%. Для данного диапазона измерений получена зависимость отношения полных перепадов давления водного раствора и воды при кипении в канале.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант № 05-02-16659 а.

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

w – скорость, м/с;
 P – давление, Па;
 t – температура, °С;
 X – массовое паросодержание;
 G – ускорение свободного падения, м/с²;
 C, S – концентрация раствора, г/кг;
 H, h – высота участка, м;
 l – длина участка, м;
 d – диаметр участка;

ρ – плотность среды, кг/м³;
 σ – поверхностное натяжение;
 ϕ – истинное паросодержание;
 ψ – коэффициент, учитывающий структуру потока;
 ζ – коэффициент сопротивления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Кутепов А.М., Стерман Л.С., Стюшин Н.Г.** Гидродинамика и теплообмен при парообразовании. М.: Высшая школа, 1986. 392 с.
2. **Карцев А.С.** Исследование влияния минерализации на гидродинамику и теплообмен в испарителях кипящего типа: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 2004. 20 с.
3. **Шкондин Ю.А.** Исследование тепловых процессов и разработка методики теплогидравлического расчета испарителей: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. М.: МЭИ, 1997. 20 с.
4. **Буяков Д.В.** Исследование влияния концентрации водного раствора сульфата натрия на теплообмен в испарителях и паропреобразователях: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. М.: МЭИ, 1999. 20 с.
5. **Агапов Р.В.** Исследование эффективности схем МИУ с испарителями различных типов при концентрировании многокомпонентных растворов: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. М.: МЭИ, 2003. 20 с.
6. **Васин В.А.** Исследование тепловых и гидродинамических процессов и разработка методик расчета переточных устройств и испарителей: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 1993. 20 с.
7. **Kuzma-Kichta Yu.A., Sedlov A.S., Kartsev A.S., Konjokov E.O.** Boiling of aqueous solutions, GIFU Proceedings of thermal engineering conference, 2005.
8. **Сухарев Е.И.** Влияние структуры пароводяной смеси на гидродинамические характеристики сопротивления циркуляционных контуров паровых котлов // Электрические станции. 1960.