

2001. - Vip. 11. - S. 243 - 249. (Rus.)
12. Moiseyev M.G. Some features of flow of gas are in the overexpanded axisymmetrical nozzle / M.G. Moiseyev, E.A. Nikulicheva, V.S. Suminova // *Techeniye vyazkogo i nevyazkogo gaza. Dvukhfaznie zhidkosti.* - L. : LGU, 1980. - S. 177 - 184. (Rus.)
13. Lukhtura F.I. One-dimensional theory of off-design supersonic gas jets / F.I. Lukhtura // *Fluid Dynamics*, 1993. – V.28, № 1. – P. 35 – 40.
14. Davidson V.E. Research of ejection properties of blast streams / V.E. Davidson, V.N. Yevchenko // *Gidromekhanika i teoria uprugosti.* - Dnepropetrovsk : DGU, 1982. - Vip.29. - S. 44-51. (Rus.)

Рецензент: В.А. Маслов  
д-р техн. наук, проф. ГВУЗ «ПГТУ»

Статья поступила 5.03.2012

УДК 621.182.12

©Лухтура Ф.И.<sup>1</sup>, Баев А.В.<sup>2</sup>

### ГИДРОГАЗОДИНАМИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ДЕАЭРАЦИОННЫХ УСТАНОВОК ЦЕНТРОБЕЖНОГО ТИПА

*Представлен метод расчета гидродинамических параметров деаэрационных установок. Показаны основное направление оптимизации их геометрических размеров и выбор компоновки.*

**Ключевые слова:** деаэратор, закрученный поток, гидрогазодинамические характеристики, геометрический комплекс деаэратора.

*Лухтура Ф.И., Баев А.В. Гідрогазодинамічні параметри деаераційних установок відцентрового типу. Представлений метод розрахунку гідродинамічних параметрів деаераційних установок. Показані основні напрями оптимізації їх геометричних розмірів і вибір компоновання.*

**Ключові слова:** деаератор, закручений потік, гідрогазодинамічні характеристики, геометричний комплекс деаератора.

**F.I. Lukhtura, A.V. Bayev. Gas-fluid dynamic parameters of a centrifugal type deaeration plants.** *The method of calculation of hydrodynamic parameters for deaeration installations was presented. The basic directions of optimization of their geometrical sizes and a configuration choice are shown.*

**Keywords:** deaerator, swirling flow, fluid dynamic characteristics, geometrical complex of a deaerator.

**Постановка проблемы.** Развитие деаэрационной техники в настоящее время идет, в числе прочего, по пути разработки новых конструкций деаэраторов [1-5]. Одним из примеров аппаратов нового типа является центробежно-вихревой деаэратор (ДЦВ) [2].

В последнее время для интенсификации процесса деаэрации используется центробежно-вихревой деаэратор (ДЦВ) с тангенциальным подводом деаэрируемой воды и греющего пара. Главной проблемой оптимизации работы и выбора компоновки деаэраторов центробежного типа является сложность расчета параметров индуцированных вихревых пароводяных потоков и их связь с габаритами самого деаэратора.

**Анализ последних исследований и публикаций.** При вращательном движении газа и жидкости в цилиндрических аппаратах, имеющих тангенциальный вход, при термической деаэрации происходит разделение потока на две фазы: на периферии образуется закрученный поток жидкости, а в приосевой зоне – закрученный поток газа (паровоздушная смесь). Один из удачных компоновок

<sup>1</sup> ст. преподаватель, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь

<sup>2</sup> студент, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь

деаэраторов такого центробежно-вихревого типа был изобретен в начале 80-х годов прошлого века. Подобные свойства закрученного потока использует устройство для деаэрации смазочного масла [5]. В Российской Федерации изготовление и продажей подобных деаэраторов занимаются ООО «АэроГидроТех» и ЗАО «ИНТЕКС». В Украине деаэраторы аналогичной конструкции пока не изготавливаются. Выбор геометрических характеристик таких деаэраторов и метод их расчета в печати практически отсутствуют. Для расчета отдельных элементов (компонентов) деаэратора, например, устройства для создания закрученного (вихревого) потока, можно воспользоваться известными методиками с использованием теории центробежной форсунки [6]. Однако в связи с возможной спецификой процесса деаэрации, заключающейся в подаче греющего пара во вращающийся поток, существующие методики требуют значительной доработки.

**Цель статьи** – создание, на основе теории идеальной форсунки [6], математической модели идеального центробежного деаэратора с тангенциальной подачей греющего пара и методики расчета оптимальных его размеров.

**Изложение основного материала.** Деаэрация воды – удаление из жидкости растворенных в ней газов. Это основной способ борьбы с коррозией в трубах пароводяного тракта и технологического оборудования промышленности и энергетики. Основным теплоагрегатом для проведения процесса десорбции является деаэратор.

ДЦВ представляет собой цилиндрический аппарат с тангенциальным подводом воды, в котором образуется центральный паровоздушный вихрь. Закрученный поток воды в радиальном направлении продувается паром. При этом развиваемые турбулентностью поверхности контактирующих фаз обеспечивают интенсивный нагрев воды до состояния насыщения. Преимуществом центробежно-вихревого деаэратора являются:

- способность работать при различных давлениях (при атмосферном, повышенном давлении или под вакуумом);
- малая металлоемкость;
- обладают достаточно большой удельной производительностью.

При создании математической модели ДЦВ и для нахождения связей между параметрами газа (пара) и жидкости с геометрическими размерами ДЦВ использовались уравнения сохранения механической энергии, массы и момента количества движения, применяемые в теории идеальной форсунки, и уравнения тепло- и массообмена между греющей и нагреваемой средами.

При этом газ полагали совершенным, жидкость – несжимаемой, векторы скорости газа в общем случае направлены под углом  $\pm\alpha$  к направлению движения слоя жидкости, и параллельны оси парового сопла. Допускали также, что инерционные силы преобладают над силами Архимеда (пренебрегали силами плавучести) и силами тяжести.

При взаимодействии паровых струй пара с деаэрируемой водой пренебрегали различной степенью ассимиляции пара при изменении температуры воды по высоте слоя, изменениями размеров конуса конденсации при истечении пара со сверхзвуковыми скоростями, влиянием на процесс взаимодействия сверхзвуковых струй пара с жидкостью степени нерасчетности истечения из сопел и др. Кроме того полагали, что отсутствует пробойный режим при этом взаимодействии.

Для нахождения связи между параметрами газа (пара) и жидкости с геометрическими размерами ДЦВ были использованы:

- материальный баланс деаэратора:

$$m_k + M = m - M_{\text{вып}}; \quad (1)$$

- тепловой баланс деаэратора:

$$m_k I_k + M \cdot I_{\text{гр}} = m \cdot I_{\text{пв}} - M_{\text{вып}} I_d; \quad (2)$$

- законы сохранения момента количества движения:

$$mw_{\text{вх}} R \pm Mw_{\text{ex}} R \sin \alpha = (m + M)ur; \quad (3)$$

$$w_{\text{вх}} = m / \rho_1 \pi r_{\text{вх}}^2;$$

$$ur = u_m r_m = w_{\text{вх}} R \left( \frac{1 \pm \frac{Mw_{\text{ex}} \sin \alpha}{mw_{\text{вх}}}}{1 + \frac{M}{m}} \right) = w_{\text{вх}} R \cdot B;$$

- закон сохранения энергии (уравнение Бернулли):

$$p + \frac{\rho_1}{2} \cdot (u^2 + w^2) = p_0; \quad (4)$$

$$p = \frac{1}{2} \rho_1 u_m^2 \left( 1 - \frac{u^2}{u_m^2} \right) = \frac{1}{2} \rho_1 u_m^2 \left( 1 - \frac{r_m^2}{r^2} \right); \quad u_m = w_{\text{вх}} RB / r_m = mRB / \rho_1 r_m n \pi r_{\text{вх}}^2;$$

$$w = \sqrt{\frac{2}{\rho_1} p_0 - u_m^2} = \sqrt{\frac{2}{\rho_1} p_0 - \frac{m^2 R^2 B^2}{\rho_1 r_m^2 n^2 \pi^2 r_{\text{вх}}^4}} = \text{const};$$

- уравнение сохранения массового расхода:

$$(M + m) = \rho w \pi r_c^2 \varphi_c; \quad (4)$$

$$\varphi_c = 1 - \frac{r_m^2}{r_c^2}; \quad w = \frac{M + m}{\rho \varphi_c \pi r_c^2};$$

$$m = \mu \pi r_c^2 \sqrt{2 p_0 \rho_1}; \quad \mu = \frac{1}{\sqrt{\frac{(M + m)^2}{A^2 B^2} + \frac{m^2}{\varphi_c^2}}}; \quad A = \frac{R r_c \pi}{n f_{\text{вх}}} \cdot \sin \beta_k,$$

- где  $m_k$  – массовый расход основного конденсата;  
 $M_{\text{вып}}$  – массовый расход выпара;  
 $I_k$  – энтальпия основного конденсата;  
 $I_{\text{гр}}$  – энтальпия греющего пара;  
 $I_{\text{пв}}$  – энтальпия питательной воды;  
 $I_d$  – энтальпия пара при давлении в деаэраторе;  
 $u$  – тангенциальная составляющая скорости вращающегося потока;  
 $r$  – расстояние от оси вращения до частицы жидкости;  
 $w_{\text{вх}}$  – скорость жидкости во входных (тангенциальных) каналах;  
 $R$  – расстояние от оси вращения до оси канала (плечо закручивания) ( $R_{\text{ж}} \approx R_{\text{п}} = R$ );  
 $m$  – массовый расход питательной воды;  
 $M$  – массовый расход греющего пара;  
 $w_{\text{ex}}$  – скорость пара в изобарическом (начальном) сечении паровой струи [2];  
 $\alpha$  – угол наклона паровых отверстий к нормали к поверхности;  
 $p$  – статическое давление в потоке;  
 $w$  – осевая составляющая скорости в сопле-шайбе деаэратора;  
 $n$  – число входных каналов;  
 $r_c$  – радиус сопла;  
 $r_{\text{вх}}$  – радиус входного патрубка;  
 $\beta_k$  – угол между направлением входного канала и осью вращения;  
 $\varphi_c$  – коэффициент заполнения сопла;  
 $A$  – геометрический комплекс деаэратора;  
 $B$  – гидродинамический комплекс деаэратора.

На основе представленной математической модели были получены связи геометрической характеристики ДЦВ

$$A' = \frac{A \cdot B}{M/m + 1}, \quad (6)$$

$$A = R r_c \sin \beta_k / n r_{\text{вх}}^2, \quad B = \left( \frac{1 \pm \frac{M w_{\text{ex}} \sin \alpha}{m w_{\text{вх}}}}{1 + \frac{M}{m}} \right),$$

- где  $R$  – радиус тангенциального подвода питательной воды в деаэратор;  
 $r_c$  – внутренний радиус разделительной шайбы;

$n$  и  $r_{вх}$  – соответственно число подводов и радиус подводящего трубопровода деаэрируемой питательной воды, с параметрами пара, истекающего из паровых отверстий при докритических и сверхкритических перепадах давления, и основными характеристиками вращающегося потока деаэрируемой воды, что позволяет рационально подбирать размеры ДЦВ для требуемой производительности, в том числе размеры паровых сопел и др. Графики некоторых полученных зависимостей (рис. 1-3) представлены ниже. Данные зависимости были получены при следующих условиях: температура греющего пара  $t_0 = 175^{\circ}\text{C}$ ; давление греющего пара  $P_0 = 0,9$  МПа; показатель адиабаты пара  $k = 1,3$ ; рабочее давление в деаэраторе  $P_p = 0,6$  МПа; температура основного конденсата  $t_k = 139^{\circ}\text{C}$ ; температура питательной воды  $t_{пв} = 158,8^{\circ}\text{C}$ ; плотность питательной воды  $\rho_{пв} = 908,1$  кг/м<sup>3</sup>; радиус входного канала  $r_{вх} = 0,16$  м; угол наклона паровых отверстий  $\alpha = 90^{\circ}$ ; число входных каналов  $n = 2$ .

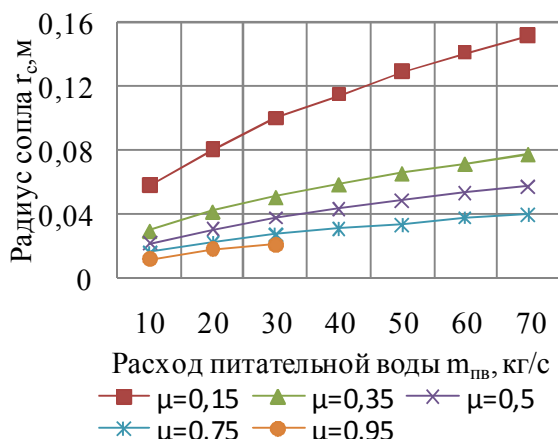


Рис. 1 – Влияние производительности деаэратора  $m_{пв}$  и коэффициента расхода  $\mu$  сопла-шайбы на размеры последнего

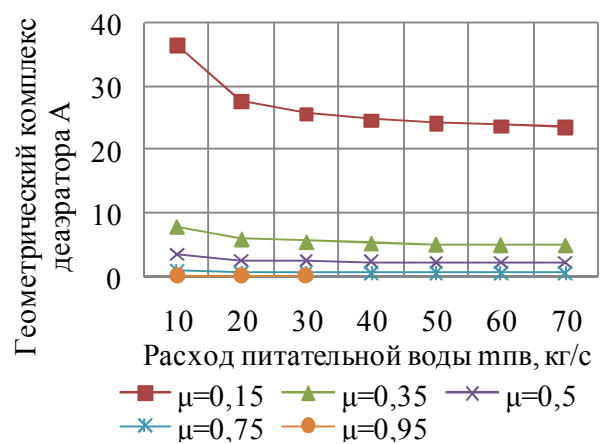


Рис. 2 – Влияние производительности деаэратора  $m_{пв}$  и коэффициента расхода  $\mu$  сопла-шайбы на геометрические характеристики деаэратора

По данным зависимостям при принятых допущениях видно, что при увеличении производительности деаэратора увеличиваются его газодинамические характеристики, а именно коэффициент заполнения сопла и коэффициент расхода деаэратора. При этом геометрические характеристики (комплекс  $A'$  и радиус корпуса  $R$ ) уменьшаются, при увеличении радиуса  $r_c$  шайбы-сопла. Следовательно, использование центробежно-вихревых деаэраторов для малых расходов питательной воды при условии максимального расхода нецелесообразно.

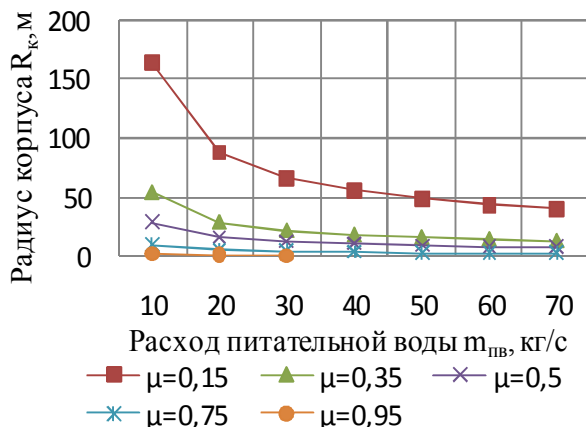


Рис. 3 – Влияние производительности агрегата  $m_{пв}$  и коэффициента расхода  $\mu$  сопла-шайбы на размеры корпуса деаэратора

### Выводы

1. Математическая модель позволяет определить геометрические характеристики ДЦВ для различных входных и выходных параметров и подбирать оптимальные конструктивные размеры.
2. С помощью модели можно прогнозировать процессы, происходящие в центробежно-вихревом деаэраторе, в т.ч. на переменных режимах работы.
3. Дальнейшее изучение этой проблемы

при учете вязких потерь и в местных сопротивлениях, сил тяжести и Архимеда, действующих на поток, и других явлений, возникающих в вихревом потоке при подаче греющего пара, позволит уточнить математическую модель ДЦВ и более полно изучить процессы, происходящие в ДЦВ.

**Список использованных источников:**

1. Шарапов В.И., Цюра Д.В. Термические деаэраторы / Ульянов. гос. техн. ун-т. – Ульяновск, 2003.
2. Пат. 2131555 Россия: F 22 D 1/50, C 02 F 1/20, B 01 D 19/00. Деаэратор (теплообменник) / Б.А. Зимин ; заяв. и патентооблад. Б.А. Зимин . – № 97121266/06; заявл. 09.12.1997; опубл. 10.06.1999, Бюл. № 22 (I ч.). – 4 с.
3. Деаэрационная установка двойного назначения на основе центробежно-вихревых деаэраторов / А.В. Мошкарин, Г.В. Ледуховский, В.Н. Виноградов, Б.А. Зимин, Е.Н. Топоров, И.А. Борисов // Вестник ИГЭУ. – 2009. - Вып. 4. – С.1-5.
4. Пат. 2151341 Россия, МПК F 22 D 1/50, C 02 F 1/20. Деаэратор.
5. Пат. 2086289 Россия, МПК B 01 D 19/00. Устройство для деаэрации смазочного масла.
6. Дитякин Ю. Ф. Распыливание жидкости/ Ю.Ф. Дитякин, Л.А. Клячко, Б.В. Новиков, В.И. Ягодкин – М.: Машиностроение, 1977. - 208 с.

**Bibliography:**

1. Sharapov V.I., Tsyura D.V. Thermal deaerators / Ulyan. gos. tekhn. univ. - Ulyanovsk, 2003. (Rus.)
2. Pat. 2131555 Russia, F 22 D 1/50, C 02 F 1/20, B 01 D 19/00. Deaerator / B.A. Zimin ; zaav. i patentoobl. B.A. Zimin. - № 97121266/06; zaavvl. 09.12.1997; opubl. 10.06.1999, Byul. № 22 (I ch.). - 4 s. (Rus.)
3. Deaerating plant of double-duty on the basis of centrifugal-vortical deaerators / A.V. Moshkarin, G.V. Ledukhovskii, V.N. Vinogradov, B.A. Zimin, Ye.N. Toporov, I.A. Borisov // Vestnik IGEU. - 2009. - Vip. 4. - S.1-5. (Rus.)
4. Pat. 2151341 Russia, MPK F 22 D1/50, C 02 F 1/20. A deaerator. (Rus.)
5. Pat. 2086289 Russia, MPK B 01 D 19/00. Device for the deaeration of luboil. (Rus.)
6. Dityakin Yu.F. Распыливание of liquid/ Yu.F. Dityakin, L.A. Klyachko, B.V. Novikov, V.I. Yagodkin - M. : Mashinostroyeniye, 1977. - 208 s. (Rus.)

Рецензент: В.А. Маслов  
д-р техн. наук, проф. ГВУЗ «ПГТУ»

Статья поступила 7.03.2012

УДК 536.24

©Шаламов Ю.Н.<sup>1</sup>, Берестовой И.О.<sup>2</sup>, Айнагоз Г.В.<sup>3</sup>

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ВНУТРЕННЕГО ТЕПЛООБМЕНА В ПЕЧАХ ПРИ НАГРЕВЕ МЕТАЛЛА**

*В статье предложен метод расчета внутреннего теплообмена в печах при нагреве металла на основе построения номограмм для термически «тонкого» тела при лучистом внешнем теплообмене.*

**Ключевые слова:** термически «тонкое» тело, нестационарный процесс, тепловой поток, теплообмен, нагрев, лучистый теплообмен.

<sup>1</sup> канд. техн. наук, доцент, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь

<sup>2</sup> ассистент, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь

<sup>3</sup> ассистент, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь