

А.В. ШУШЛЯКОВ, Е.В. КРИШТАЛЬ

Харьковский государственный технический университет строительства и архитектуры, г. Харьков

АЭРОДИНАМИКА И ЭФФЕКТИВНОСТЬ РАБОТЫ ВИХРЕВЫХ ДЕСОРБЕРОВ

Исследована аэродинамика мультивихревого турбулентного аппарата и очистка термальной воды от примесей пожаро- и взрывоопасных газов. Выполнены расчеты распределения скоростей жидкости и газа вдоль радиусов и по высоте рабочей камеры, бункера и сепарационной камеры. Рассчитана эффективность десорбции газов из термальной воды.

Термальные воды отличаются минеральным составом воды и растворенных в ней газов, давлением и температурой. Минеральный состав термальной воды зависит от температуры и равновесия между минералами твердых пород, водой и газами, растворенными в воде.

Температура термальных вод изменяется в широком диапазоне от 4-5°C до 380°C. Высокая температура воды может быть обусловлена тем, что вблизи горячих источников наблюдается активная вулканическая деятельность, либо протекают окислительные процессы веществ органического происхождения. В термальных водах могут содержаться газы биохимического происхождения (CH_4 , CO_2 , N_2 , H_2S , H_2 , O_2), газы атмосферного происхождения (N_2 , O_2 , CO_2 , Ar), газы химического происхождения (CO_2 , H_2S , H_2 , CH_4 , CO , N_2 , HCl , HF , SO_2 , Cl_2 , NH_3).

По составу растворенных в воде газов высокотемпературные термальные воды относятся к углекисло-сероводородному типу и содержат газы биохимического происхождения CO_2 , H_2S , H_2 , CH_4 , NH_3 . В термальных водах с низкой температурой содержатся разные газы, в том числе химически агрессивные. В процессе добычи и использования термальных вод агрессивные газы разрушают системы трубопроводов и оборудование.

Термальные воды в настоящее время широко используются в качестве источников тепловой энергии или источников минерального сырья (из термальных вод извлекают минеральные соли или газы), а также в качестве лечебных источников. Энергию термальных источников широко используют для выработки электроэнергии. В конце XX века мощность термальных электростанций составляла около 4,5 млн кВт.

В настоящее время интенсивность использования термальных вод увеличивается. Термальные воды широко используются для целей теплоснабжения, отопления и вентиляции. В том случае, если в термальных водах содержатся газы, способные гореть, их извлекают и используют в качестве газообразного топлива.

Таким образом, перед использованием термальные воды подвергаются очистке от газообразных и твердых примесей. Для эффективной очистки термальных вод от газообразных примесей необходимо максимально увеличить поверхность массообмена жидкой фазы, а также перепад парциальных давлений газов при данных параметрах извлекаемых газов и при их полном насыщении.

Разность парциальных давлений можно обеспечить за счет разряжения, создаваемого вентилятором в некотором объеме, в который подается термальная вода. Увеличить площадь поверхности жидкой фазы можно путем барбатирования или диспергации жидкости.

В качестве оборудования для десорбции газов из жидкости нами были разработаны вихревые турбулентные промыватели (ВТП) [1]. Конструкция и принцип работы ВТП изложены в работах [2, 3]. Производительность ВТП по газу одного аппарата должна быть до 12 000 м³/час. Дальнейшее увеличение производительности по газу приводит к непропорциональному увеличению сопротивления ВТП.

С целью повышения эффективности десорбции газов и увеличения производительности по газу без существенного увеличения сопротивления аппарата был разработан мультивихревой турбулентный промыватель (МВТП). Схема конструкции МВТП представлена на рис.1.

Принцип работы МВТП заключается в следующем: МВТП состоит из патрубка для подвода термальной воды в распределительную камеру переменного сечения 6, которая примыкает к корпусу МВТП 1 по спирали. Поток термальной воды движется в распределительной камере 6 с постоянной скоростью. Из распределительной камеры 6 поток поступает в межлопаточные каналы завихрителя МВТП 8. Распределительная камера 6, кольцевая щель 5 в корпусе 1 и лопатки 7 образуют инерционный разделитель, лопатки 7 которого крепятся в верхних и нижних концах к корпусу 1. С помощью инерционного разделителя поток термальной воды делится на плоские струи. Через некоторое расстояние за счет воздействия гидродинамических сил и аэродинамического сопротивления струи диспергируются на капли. Размер капель зависит от скорости потока, температуры, плотности и других свойств воды. Размер капель зависит от многих факторов, которые входят в критерий Вебера [4].

$$W = \frac{\rho u^2 d}{2\sigma} > W^* \quad (1)$$

Процесс диспергации жидкости может протекать путем деления потока на капли. При этом с поверхности капля может срываться пелена более мелких капель (сдир). При резком изменении давления в потоке жидкости или при объемном кипении диспергация жидкости может носить взрывной характер. Режим дробления потока на капли характеризуют критерии Вебера и Рейнольдса [4]:

$$WR_g^{-0,5} \geq 0,5 \quad (2)$$

$$\begin{cases} 4 \leq W \leq 20, \\ 0,1 \leq WR_g^{-0,5} \leq 0,8 \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} 10 \leq W \leq 10^4 \\ 0,5 \leq WR_g^{-0,5} \leq 10 \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} 10^3 \leq W \leq 10^5 \\ 10 \leq WR_g^{-0,5} \leq 10^2 \end{cases} \quad (5)$$

По спектру образующихся капель первый режим дробления капель протекает путем простого деления капли без сдира. Второй режим – разрушение капли со сдиром пелены с поверхности капли. Третий режим – взрывное дробление капли.

Режим взрывного дробления жидкости связан с неустойчивостью Рэлея – Ламба – Тейлора. Этот вид разрушения крупных капель на более мелкие (взрывное кипение), характеризуется критерием Бонда:

$$B = a \rho_f d^2 \sigma^{-1} \quad (6)$$

где: a - ускорение капли;

ρ_f - плотность жидкости, г/см³;

d - диаметр капли до кипения, мкм;

σ - сила поверхностного натяжения, н/м.

Критерий Бонда пропорционален критерию Вебера: $B = 0,75 c_x W$ (7)

где: c_x - коэффициент лобового сопротивления капли.

Критическое значение составляет $B \approx 5 \cdot 10^3$.

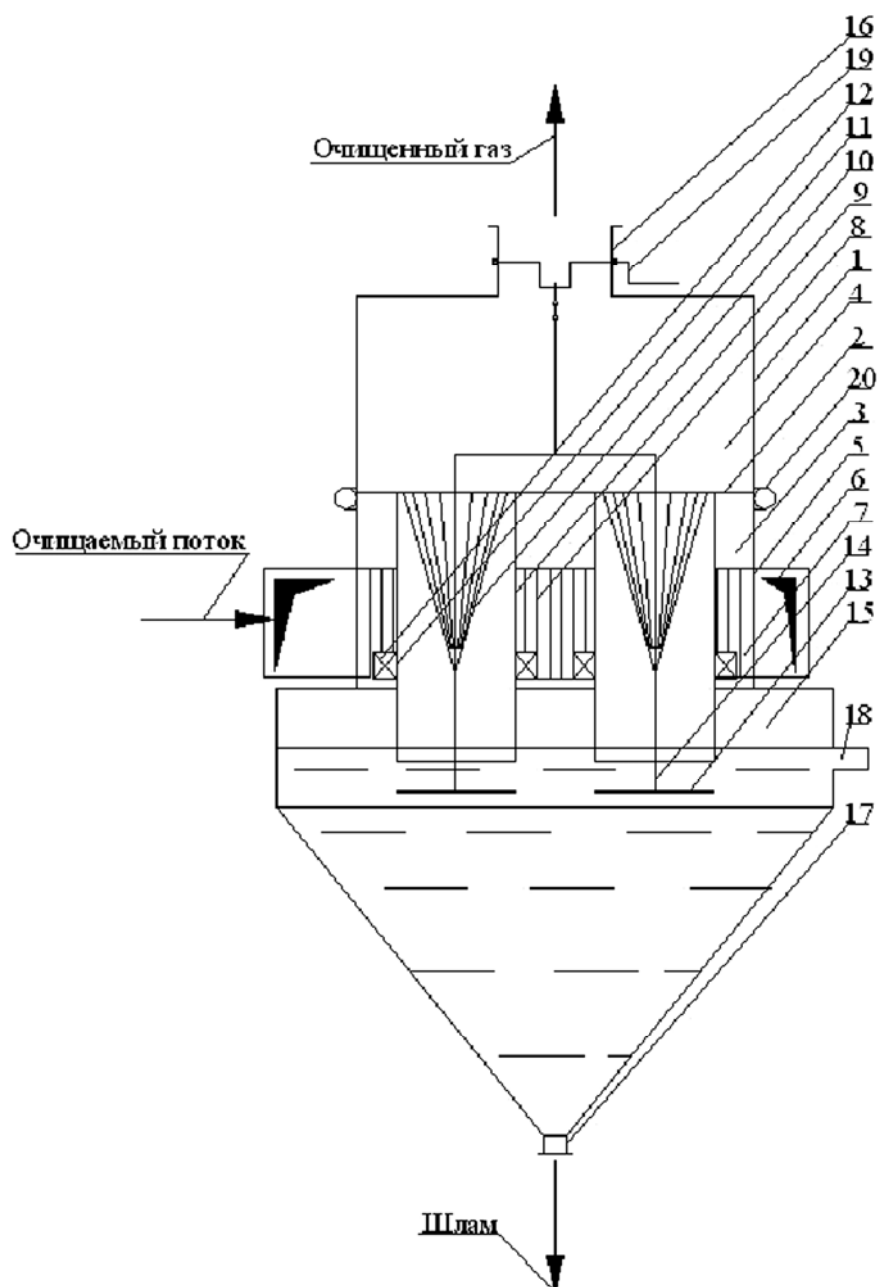


Рис. 1. Мультивихревой турбулентный промыватель

1. Корпус МВТП; 2. Горизонтальная перегородка; 3. Нижняя камера; 4. Верхняя камера; 5. Отверстие в корпусе нижней камеры; 6. Распределительная камера; 7. Лопатки завихрителя МВТП; 8. Завихритель МВТП; 9. Модуль; 10. Каплеотделитель; 11. Отверстие в корпусе модуля; 12. Завихритель модуля; 13. Диск; 14. Шток; 15. Бункер; 16. Патрубок для удаления очищенного газа; 17. Патрубок для удаления шлама; 18. Патрубок для слива воды; 19. Устройство для подъема диска со штоком; 20. Коллектор воды.

В процессе дробления потока на капли происходит активная десорбция газов из капель. Процесс десорбции можно рассчитать по формуле:

$$G_{\text{dec}} = k_{zi} P_i \quad (8)$$

где: k_{zi} – растворимость газа в термальной воде;

P_i - парциальное давление i-го газа.

Время дробления капель зависит от свойств жидкости и скорости потока и может быть рассчитано по формуле:

$$\tau = du^{-1}(\rho_{жс} \cdot \rho^{-1})^{0,5} \quad (9)$$

Время разрушения капель от ударной волны равно:

$$\tau_2 = du^{-1}(\rho_{жс} \cdot \rho^{-1})^{0,5} \quad (10)$$

Время ускорения капли зависит от следующих параметров:

$$\tau_3 = \frac{4\rho_{жс}d}{3c_x\rho u} \quad (11)$$

Время возникновения неустойчивости Рэлея – Ламба – Тейлора можно определить по формуле:

$$\tau_4 = du^{-1}(\rho_{жс} \cdot \rho^{-1})^{0,5} \quad (12)$$

Время взрывного распада капли равно:

$$\tau'_4 = 10 \cdot \tau_4 \cdot W^{-0,25} \quad (13)$$

Приведение формулы расчета времени, в течении которого сформируются условия для разрушения капель жидкости, дают значения одного порядка.

Капли жидкости осаждаются в бункере МВТП 15. За время с момента дробления потока на струи, а затем дробления струй на капли и до момента осаждения капель в бункере 15 из термальной воды может выделяться часть газов.

Чтобы обеспечить более высокую эффективность десорбции газа, необходимо в рабочей камере МВТП смонтировать дополнительные модули 9 для рециркуляции жидкости и её диспергации на капли. Корпус модулей 9 должен быть погружен в воду в бункере 15 на глубину, не менее разряжения (мм. в. ст.) в его рабочей камере. Количество модулей 9, смонтированных в одном МВТП, зависит от объема газа, выделяющегося при дроблении потока термальной воды на струи и капли и рассчитывается по формуле:

$$n_m = \frac{G_{воды} k_{дес}}{L_{мод}} \quad (14)$$

где: $k_{дес}$ - коэффициент десорбции;

$L_{мод}$ - производительность модуля по газу.

Выделившийся газ, за счет разряжения, создаваемого вентилятором в рабочей камере модуля 9, поступает в завихритель модулей 7, закручивается и поступает в рабочую камеру в модули 7 МВТП в виде вращающегося потока газа. При вращении газа над неподвижным слоем воды в бункере МВТП, верхний слой воды сдвигается в приосевую зону и уносится потоком газа в рабочую камеру 8 модуля 7, где под действием центробежных и аэродинамических сил вода диспергируется на мелкодисперсные капли. За счет разряжения в рабочей камере модуля 9 и увеличения площади поверхности капель происходит активная десорбция газа. Очищенная вода из рабочей камеры модуля 9 возвращается в бункер 15, а новая порция воды поднимается из бункера 15 для десорбции. Процесс рециркуляции жидкостей в модулях 9 протекает в автоматическом режиме.

Таким образом, в МВТП производится очистка воды от взвешенных и газообразных примесей. Очищенная термальная вода используется в качестве теплоносителя в системах теплоснабжения, отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха, а газ – в качестве топлива.

Эффективность десорбции газа можно рассчитать по формуле:

$$\eta = 1 - (1 - \eta_{метн})(1 - \eta_{мод.}) \quad (15)$$

где: $\eta_{\text{МВТП}}$, $\eta_{\text{мод.}}$ – эффективность работы МВТП и модуля.

При известных значениях массы газа, удалённого из жидкости за счет десорбции, эффективность работы МВТП можно рассчитать по формуле:

$$\eta = \frac{G_2 - G_{\text{дес.}}}{G_2} \cdot 100\% \quad (16)$$

где: G_2 - масса горючих компонентов газа, которая содержится в термальной воде в растворенном виде;

$G_{\text{дес.}}$ - масса газа, выделившегося из термальной воды путем десорбции.

Как правило, в термальной воде может содержаться до 5% массы газа. Тогда:

$$G_2 = Z \cdot G_{\text{воды}} \quad (17)$$

Подставляя (16) в (15), получим:

$$\eta = \frac{Z \cdot G_{\text{воды}} - G_{\text{дес.}}}{Z \cdot G_{\text{воды}}} \cdot 100\% \quad (18)$$

где: z - концентрация газов в термальной воде.

Количество газа, которое выделится из термальной воды в процессе десорбции, зависит от растворимости газа, состава газов и воды, температуры воды, скорости потока воды и диаметра капель, разности парциальных давлений газов при полном насыщении и при данных условиях.

В соответствии со свойствами газов и термальных вод рассчитываем критерий Вебера и определяем максимальный диаметр капель. По расходу воды и диаметру капель определяем объем одной капли и количество капель:

$$n = \frac{G_{\text{воды}}}{\frac{\pi d^3}{6} \cdot \rho_{\text{ж}}} \quad (19)$$

где: $G_{\text{воды}}$ - масса термальной воды;

d - диаметр капель;

$\rho_{\text{ж}}$ - плотность воды (жидкости).

Рассчитываем площадь поверхности капель:

$$F = n \cdot f \quad (20)$$

где: f - площадь поверхности одной капли диаметром d .

Количество газа, которое может выделяться из воды путем десорбции в рабочей камере МВТП, равно:

$$G_1 = k_{gi} P_{i\text{МВТП}} \quad (21)$$

G_1 - количество i -го газа, выделившегося в рабочей камере МВТП ;

K_{gi} -коэффициент растворимости газа;

P_i - парциальное давление i -й примеси в газовой фазе, находящейся в равновесии с раствором, Па или атм.

Количество газа, которое может выделяться из воды в бункере, равно:

$$G_2 = k_{gi} P_{i\text{мод}} \quad (22)$$

Общее количество газа, выделившегося при делении потока на струи и капли в МВТП и в модулях, будет равно:

$$G = G_1 + G_2 \quad (23)$$

Проверку расчетов следует проводить путем сравнения требуемой площади поверхности капель с расчетной площадью поверхности капель в рабочих камерах МВТП и модулей или в рабочей камере ВТП.

Для расчета критериев Вебера, Рейнольдса необходимо знать скорости потоков жидкости и газа в рабочей камере ВТП, МВТП и модуля, в бункере модуля ВТП, а также в сепарационной камере ВТП и модулей.

Используя методики [5, 6], представим движение жидкости в рабочей камере и в бункере МВТП, ВТП и модуля, как вращение жидкости над неподвижным основанием, а движение закрученных потоков газа, как движение газа вблизи вращающегося диска. Течение газа заменим условным течением газа вблизи вращающегося диска. Выполненные расчеты распределения скоростей жидкости и газа вдоль радиусов и по высоте рабочей камеры, бункера и сепарационной камеры наглядно можно представлять в виде графиков. На рис.2, как пример, показан график распределения относительной радиальной составляющей скорости вдоль относительного радиуса рабочей камеры.

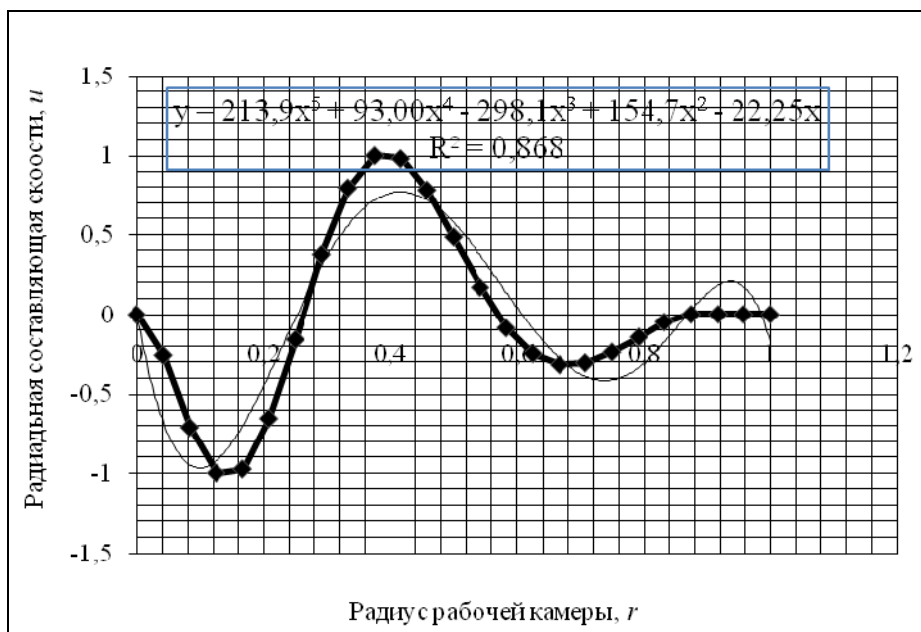


Рис. 2. График зависимости радиальной составляющей скорости жидкости от радиуса рабочей камеры

Анализ графиков показал, что принятая модель течения жидкости и газа в элементах конструкции МВТП соответствует физической картине течений, наблюдаемых в прозрачной модели аппарата.

В приосевой зоне бункера радиальная составляющая скорости потока имеет минимальное значение и направлена в сторону оси аппарата.

В пристеночной зоне бункера веерный поток жидкости возвращается из рабочей камеры, поэтому радиальная составляющая скорости направлена также в сторону оси. Максимальное значение относительной радиальной составляющей скорости $\bar{u}$ в бункере имеет место при $\bar{r} = 0,92$.

В пределах $0,45 < \bar{r} < 0,75$ относительная радиальная составляющая скорости направлена в сторону от оси к корпусу бункера.

Аппроксимация графика (см. рис.3) с помощью многочленного полинома позволила получить формулу для расчета $\bar{u}$:

$$\bar{U} = 213,9 \bar{r}^5 + 93,00 \bar{r}^4 - 298,1 \bar{r}^3 + 154,7 \bar{r}^2 - 22,25 \bar{r} \quad (24)$$

Относительная тангенциальная (окружная) составляющая скорости жидкости в бункере увеличивается по мере увеличения радиуса. При относительном радиусе

$\bar{r} = 0,82, \bar{v} = 1,0$; а при $\bar{r} > 0,82$ значение $\bar{v}$ уменьшается за счет увеличения массы жидкости и за счет трения о стенки бункера.

Относительная осевая скорость потока жидкости в пределах $0 < \bar{r} < 0,75$, в основном, направлена в сторону рабочей камеры. При $\bar{r} > 0,75$ из рабочей камеры жидкость стекает (сбрасывается) в бункер, поэтому осевая составляющая скорости направлена в сторону бункера.

Характер течения жидкости в рабочей камере соответствует физическому смыслу процесса очистки жидкости путем десорбции газа в центробежном аппарате.

Характер течения газа в элементах конструкции ВТП, МВТП и модулях представлен в виде графиков. Аппроксимация графиков $u = f(\bar{r}), v = f(\bar{r}), w = f(\bar{r})$ позволяет получить эмпирические зависимости для расчета реальных значений составляющих скорости. Формулы для расчёта составляющих скорости потоков газа в рабочей и сепарационной камерах, а также в бункере аппаратов, следующие:

$$u = r\omega F(\xi) \quad (25)$$

$$v = r\omega G(\xi) \quad (26)$$

$$w = \sqrt{v\omega} H(\xi) \quad (27)$$

На основании проведенных исследований установлены закономерности распределения составляющих скорости потока жидкости в конструкции ВТП, МВТП и модулей, которые используются для очистки жидкости от газообразных примесей. Получены эмпирические зависимости для расчета составляющих скорости потоков жидкости и газа, расчета сопротивления и эффективности десорбции газов.

1. Пат. 2001010158 Украина. Апарат комплексного очищення газу мокрим способом / Шушляков А.В., Пранцуз О.С., Шушляков Д.А., Кукса А.Н. надр. 09.01.2001.

2. Шушляков А.В., Пранцуз О.С. Производственные исследования аппаратов комплексной очистки газов от композиционных примесей //Науковий вісник будівництва. – 2003. – Вип.24. – С. 191-200.

3. Шушляков А.В., Пранцуз О.С. Очистка воздуха от композиционных примесей // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. Наукові праці КДПУ. 2001. – вип. 2(11). – С. 401-404.

4. Борисов А.А., Гельфанд Б.Е., Натанзон М.С., Коссов О.М. О режимах дробления капель и критериях их существования // ИФЖ. – 1981. – т. XXXX, – №1, – С. 64-70.

5. Шлихтинг Г., Лойцянский Л.Г. Теория пограничного слоя. – М.: 1974, – 712 с.

6. Bödewadt U.T. Die Dreshströmung über festem Grund // ZAMM 20, (1940) P. 241-253.

О.В. Шушляков, Є.В. Кришталь

АЕРОДИНАМІКА ТА ЕФЕКТИВНІСТЬ РОБОТИ ВИХРОВИХ ДЕСОРБЕРІВ

Вивчена аеродинаміка мультивихрового турбулентного промивача та очистка термальної води від домішок пожежо- та вибухонебезпечних домішок. Виконані розрахунки розподілу швидкостей рідини та газу вздовж радіусу та висоти робочої камери, бункеру та сепараційної камери. Наведені формули для розрахунку ефективності десорбції газів з термальної води.

O.V. Shyshlyakov, K.V. Krishtal

AERODYNAMICS AND EFFICIENCY WORK OF VORTICAL PURIFIER

Aerodynamics of the multivortical turbulent device and clearing of thermal water of impurity of fire-dangerous and explosive gases is investigated. Calculations of distribution of speeds of a liquid and gas along radiuses and on height of the working chamber, the bunker are executed and separation chambers are presented in the form of schedules. Efficiency of desorded gases from thermal water is calculated.