

УДК 628.16.067

© М. Г. Новосёлов, аспирант
© Д. В. Ульрих, д-р техн. наук, доцент
© М. Ю. Белканова, канд. хим. наук, доцент
© С. Г. Ницкая, канд. техн. наук, доцент
(Южно-Уральский государственный университет,
Челябинск, Россия)
E-mail: ulrikhdv@susu.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2022-19-4-102-107

© M. G. Novoselov, post-graduate student
© D. V. Ulrikh, Dr. Sci. Tech., Associate Professor
© M. Yu. Belkanova, PhD in Sci. Chem., Associate Professor
© S. G. Nitskaya, PhD in Sci. Tech., Associate Professor
(South Ural State University,
Chelyabinsk, Russia)
E-mail: ulrikhdv@susu.ru

РАСЧЕТ РАССЕКАТЕЛЯ ПОТОКА ЖИДКОСТИ АЭРАТОРА ПОДЗЕМНЫХ ВОД

CALCULATION OF THE LIQUID FLOW SPLITTER OF THE GROUNDWATER AERATOR

Создание надежного и эффективного оборудования для аэрации-дегазации подземных вод позволяет решать технологические задачи удаления растворенных газов и насыщения воды кислородом воздуха. Целью данного исследования является составление порядка расчета рассекателя потока жидкости для аэратора комбинированного типа. Определен диаметр дроссельного отверстия, рассчитан диаметр рассекателя, который определяет скорость вылета потока воды с кромки рассекателя. Расчет выполнен для идеальной жидкости и предполагает, что поток воды после рассекателя разбивается на множество струек с элементарным расходом. Представлена расчетная схема движения воды под рассекателем. Применение результатов расчета позволяет создать максимально большую площадь купола воды в пределах колонны аэратора.

Ключевые слова: аэрация, дегазация, аэратор, рассекатель.

Creation of reliable and efficient equipment for aeration-degassing of groundwater solves the technological problems of removing dissolved gases and saturating water with atmospheric oxygen. The purpose of this study is to compile the procedure for calculating the liquid flow splitter for a combined type aerator. The diameter of the throttle hole is determined, the diameter of the splitter is calculated, which determines the speed of the water outflow from the edge of the splitter. The calculation is made for an ideal liquid and assumes that the water flow after the divider is divided into many streams with an elementary flow rate. A design scheme for the movement of water under the splitter is presented. Application of the calculation results allows creating the largest possible area of the water dome within the aerator column.

Keywords: aeration, degassing, aerator, splitter.

Введение

Дегазация и аэрация подземных вод при наличии в них свободной углекислоты, радона, железа (II) и марганца (II) является традиционным способом водоподготовки [1–4].

Растущий спрос на автономное водоснабжение и водоподготовку воды из подземных источников требует создания простой и надежной, недорогой и эффективной конструкции аэратора. В работе [1] приведены технологические варианты некоторых способов аэрации-дегазации подземных вод, которые основаны на интенсивном диспергировании воды до капельного состояния

под воздействием потока воздуха, аэрирующие устройства в дегазационно-аэрационных аппаратах различного типа, включая барботаж без использования загружаемых насадок, а также аппараты комбинированного типа. Известно устройство В. М. Новикова, усовершенствованное О. Б. Меженной в качестве струйного аппарата многоцелевого назначения, в том числе для аэрации воды [5, 6]. Авторами сконструирован [7, 8] и запатентован промышленный образец аэратора подземных вод, а также налажено серийное производство двух моделей: АПВ-300 и АПВ-400. В настоящей работе приводится по-

рядок расчета рассекателя для создания максимально большой площади купола воды в пределах колонны аэратора. Расчет носит универсальный характер и может применяться при разработке аналогичных конструкций.

Методы

Расчет выполнен на примере аэратора комбинированного типа (рис. 1), который содержит барботаж 4 и рассекатель (брызгальная насадка) 3. Рассекатель установлен вдоль оси колонны 2 и содержит перевернутую чашу параболического профиля и муфту с дроссельным отверстием.

В настоящей работе приводится порядок расчета с целью профилирования рассекателя и определения диаметра дроссельного отверстия $d_{отв}$ в муфте, диаметра рассекателя D_p . Расчет для идеальной жидкости без учета сопротивления атмосферы выполняется в несколько итераций. Порядок расчета следующий: профилирование рассекателя, определение геометрических характеристик рассекателя (здесь задается диаметр рассекателя D_p); определение начальной скорости ϑ_2 частицы воды; определение средней скорости жидкости в элементарной струйке ϑ_{2i} и сравнение скоростей (если скорости не равны, $\vartheta_{2i} \neq \vartheta_2$, то задается новое значение D_p); опреде-

ление потери напора жидкости на рассекателе h_f ; определение начальной скорости жидкости ϑ_1 при выходе из муфты с дроссельным отверстием; выбор диаметра дроссельного отверстия $d_{отв}$.

Определение траектории движения воды является важной задачей, поскольку требуется создать максимально большую площадь купола в пределах колонны, но при этом вылет воды за ее пределы недопустим, потому что рассекатель устанавливается выше уровня воды под крышкой аэратора. Полагаем, что траектория движения тела в поле тяжести является баллистической кривой и описывается уравнением параболы [9]. Для создания профиля рассекателя построим вспомогательную кривую $z = ax^2$ (рис. 2).

При известных размерах диаметра колонны D_k и высоты установки рассекателя h_p можно определить коэффициент a , который равен $4h_p/D_k^2$. На вершине параболы в точке 0 разместим по касательной к параболе рассекатель (перевернутую чашу), состоящий из круглой пластины и конуса (рис. 3).

На рис. 3 представлена расчетная схема для определения начальной скорости ϑ_2 . Используем уравнения для траектории струи при истечении из отверстия [10, §10-3]:

$$x = \vartheta_2 \cos \alpha t, z = \frac{gt^2}{2}, \quad (1)$$

где x, z — координаты капли с начальной точкой отчета от кромки рассекателя, м; α — угол касательной к параболе, град.; t — время движения капли, сек.; g — ускорение свободного падения, м/с².

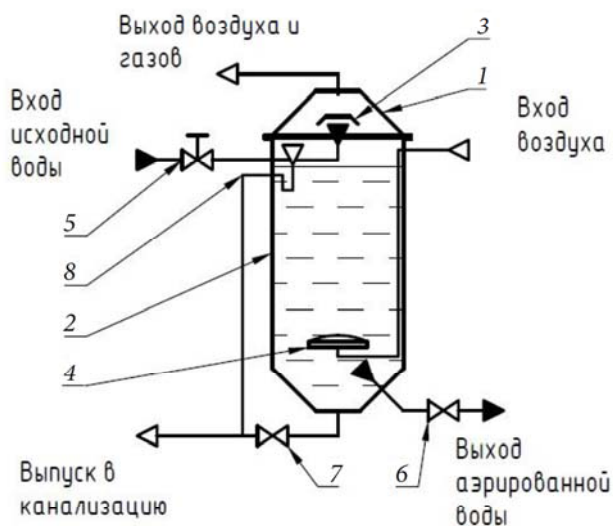


Рис. 1. Схема аэратора: 1 — крышка; 2 — колонна; 3 — рассекатель; 4 — устройство барботажа (дисковый аэратор); 5 — вентиль регулировочный на патрубке исходной воды; 6 — кран шаровый на патрубке аэрированной воды; 7 — кран шаровый на патрубке слива; 8 — переливной патрубок

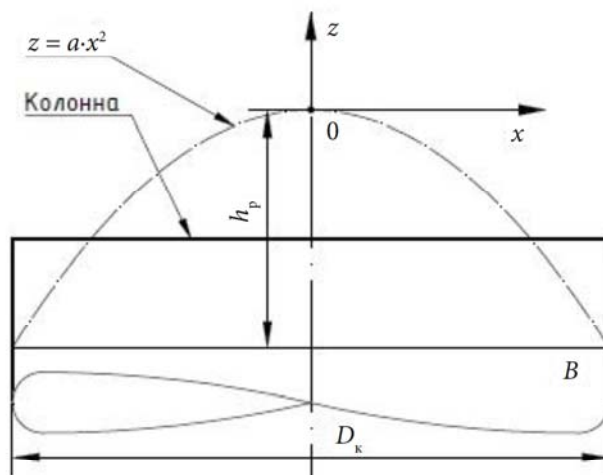


Рис. 2. Профилирование рассекателя

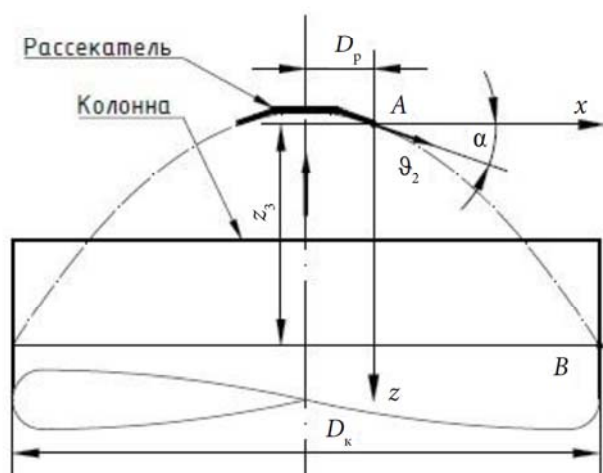


Рис. 3. Начальная скорость движения капли воды

Зададимся диаметром рассекателя D_p . Имея координаты точки В, определим время полета и начальную скорость капли воды:

$$t = \sqrt{\frac{2h_p}{g}}, \quad (2)$$

$$\vartheta_2 = \frac{(D_k - D_p)}{2 \cos \alpha t}. \quad (3)$$

На рис. 4 представлена расчетная схема движения потока жидкости под рассекателем. Для сечений 1 и 2 уравнение неразрывности струи имеет вид:

$$Q = \vartheta_1 \omega_1 = \vartheta_2 \omega_2, \quad (4)$$

где Q — расход воды через аэратор, $\text{м}^3/\text{с}$; ϑ_1, ϑ_2 — средние скорости потока воды; ω_1, ω_2 — площади поперечного сечения потока.

Предположим, что поток воды Q , ударяясь о рассекатель, разбивается на множество стру-

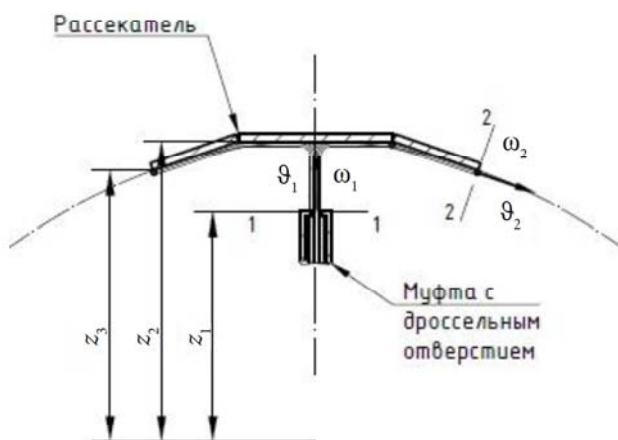


Рис. 4. Течение воды под рассекателем

ек k с элементарным расходом q_{2i} , проходящим через элементарное поперечное сечение ω_{2i} :

$$Q = \sum_{i=1}^k \vartheta_{2i} \omega_{2i} = \vartheta_2 \omega_{2i} k. \quad (5)$$

Произведение $\omega_{2i} k$ есть площадь кольца по периметру $L = \sum \Delta l$ рассекателя с диаметром D_p . Принимаем допущение равенства хорды и высоты элементарного поперечного сечения струйки $\Delta l \approx h$. Толщина слоя потока жидкости в сечении 2–2 при средней скорости движения жидкости ϑ_2 составит

$$h = \frac{Q}{\pi D_p \vartheta_2}. \quad (6)$$

Тогда количество и площадь поперечного сечения элементарных струек в сечении 2–2 составит

$$k = \frac{L}{h} = \frac{\pi D_p}{h}, \quad (7)$$

$$\omega_{2i} = \Delta l \times h = h^2. \quad (8)$$

Расход жидкости и средняя скорость потока жидкости в элементарной струйке в сечении 2–2 определяются выражениями

$$q_{2i} = q_{1i} = \frac{Q}{k}, \quad (9)$$

$$\vartheta_{2i} = \frac{q_{2i}}{\omega_{2i}}. \quad (10)$$

Критерием правильности расчета является равенство $\vartheta_{2i} = \vartheta_2$. В случае неравенства скоростей расчет повторяется с новым значением диаметра рассекателя D_p .

При коэффициенте сжатия струи потока жидкости в отверстии ε [10] площадь поперечного сечения элементарной струйки воды в сечении 1–1 составит:

$$\omega_{1i} = \frac{\omega_c}{k} = \frac{\varepsilon \omega}{k}, \quad (11)$$

где ω_c — площадь сжатого сечения струи в сечении 1–1; ω — площадь дроссельного отверстия муфты.

Если рассматривать элементарную струйку жидкости строго по оси потока, то частица воды будет двигаться со средней скоростью потока, допускаем $\vartheta_{1i} = \vartheta_1$.

Составим уравнение Бернулли для сечений 1–1 и 2–2 (см. рис. 4):

$$z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{\vartheta_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{\vartheta_2^2}{2g} + h_f. \quad (12)$$

В силу малых перепадов высот пренебрегаем потенциальной энергией жидкости, тогда урав-

нение Бернулли для элементарной струйки жидкости примет вид:

$$\frac{\vartheta_{1i}^2}{2g} = \frac{\vartheta_{2i}^2}{2g} + h_f, \quad (13)$$

где h_f — потери напора жидкости на рассекателе, м.

Потерями напора на резкий поворот и на трение пренебрегаем, тогда потери напора для местного сопротивления определяются выражением [10, §4-14]

$$h_f = \xi_{p.p} \frac{\vartheta_{2i}^2}{2g}. \quad (14)$$

Предполагаем, что коэффициент местного сопротивления и потери напора при резком расширении потока составят:

$$\xi_{p.p} = \left(\frac{\omega_{2i}}{\omega_{1i}} - 1 \right)^2, \quad (15)$$

$$h_f = \xi_{p.p} \frac{\vartheta_{2i}^2}{2g}. \quad (16)$$

Определим требуемую среднюю скорость потока жидкости в сечении 1-1 из уравнения Бернулли:

$$\frac{\vartheta_1^2}{2g} = \frac{\vartheta_2^2}{2g} (1 + \xi_{p.p}), \quad (17)$$

$$\vartheta_1 = \vartheta_2 \sqrt{1 + \xi_{p.p}}. \quad (18)$$

Выбор муфты с дроссельным отверстием $d_{отв}$ осуществляется по условию стабильной работы рассекателя, $\vartheta_c \geq \vartheta_1$, т.е. с запасом кинетической энергии струи. Здесь ϑ_c есть фактическая скорость истечения жидкости из дроссельного отверстия муфты.

Результаты и обсуждение

Расчет выполнен на примере аэратора подземных вод АПВ-400. Имеем исходные данные: диаметр колонны $D_k = 600$ мм; высота установки рассекателя над уровнем воды $h_p = 250$ мм; угол касательной к параболу $\alpha = 19$ град. Результат расчета представлен в таблице.

Сравнение площади поперечного сечения элементарных струек $\omega_{1i} \ll \omega_{2i}$ показывает, что поток расширяется с падением средней скорости с $\vartheta_1 = 15,84$ м/с до $\vartheta_2 = 1,1$ м/с и это является основной причиной падения напора на рассекателе на величину 12,73 м. Для сравнения: значение местного сопротивления при резком пово-

Результаты расчета рассекателя аэратора АПВ-400

№ п/п	Параметр	Обозначение	Значение	Ед. изм.	Формула
Исходные данные					
1	Диаметр колонны	D_k	600	мм	-
2	Высота установки рассекателя над уровнем воды	h_p	250	мм	-
3	Угол касательной к параболу	α	19	градус	-
	Диаметр рассекателя	D_p	120	мм	-
Результаты расчета					
1	Время полета капли воды	t	0,226	с	2
2	Начальная скорость капли воды	ϑ_2	1,123	м/с	3
3	Толщина слоя жидкости в сечении 2-2	h	$984,3 \cdot 10^{-6}$	м	6
4	Количество элементарных струек	k	383	шт.	7
5	Площадь поперечного сечения потока жидкости в сечении 2-2	ω_{2i}	$0,9683 \cdot 10^{-6}$	м ²	8
6	Расход жидкости в элементарной струйке	q_{2i}	$1,088 \cdot 10^{-6}$	м ³ /с	9
7	Скорость потока жидкости в элементарной струйке	ϑ_{2i}	1,124	м/с	10
8	Площадь поперечного сечения элементарной струйки жидкости в сечении 1-1	ω_{1i}	$0,0643 \cdot 10^{-6}$	м ²	11
9	Коэффициент местного сопротивления рассекателя при резком расширении потока жидкости	$\xi_{p.p}$	198	-	15
10	Потери напора на рассекателе при резком расширении потока жидкости	h_f	12,73	м	16
11	Требуемая средняя скорость потока жидкости в сечении 1-1	ϑ_1	15,84	м/с	18

роте круглых труб малых диаметров на 90° не превышает $\xi_{\text{тр}} = 2,0$, т.е. почти в 100 раз меньше полученного значения на рассекателе, $\xi_{\text{р.р}} = 198$. Для расхода воды через аэратор $1,5 \text{ м}^3/\text{час}$ наиболее подходят муфты с диаметром дроссельного отверстия $6,0\text{--}7,0 \text{ мм}$ с $\vartheta_c = 16,8 \text{ м/с}$. Так как расчет выполнен для идеальной жидкости, то оптимальный диаметр дроссельного отверстия в муфте уточняется при пуско-наладке аэратора.

Выводы

В результате исследования можно сделать следующие выводы:

1) диаметр рассекателя D_p является ключевым размером, определяющим скорость вылета потока воды ϑ_2 с кромки рассекателя. Опытно-конструкторские работы показали, что значительное увеличение диаметра рассекателя от расчетного значения снижает скорость ϑ_2 и поток жидкости начинает капать с кромки рассекателя, не формируя купол жидкости;

2) найдено простое решение задачи формирования купола потоком жидкости при сложном гидравлическом процессе;

3) порядок расчета рассекателя может применяться в аналогичных аппаратах для подземных вод со свойствами, близкими к идеальной жидкости.

Библиографический список

1. Дзюбо В. В., Алферова Л. И. Оценка способов дегазации-аэрации подземных вод // Водочистка. Водоподготовка. Водоснабжение. 2008. № 2(2). С. 58–62.
2. Жабина А. А., Ковалев С. А. Удаление агрессивных газов подземных вод методом аэрирования // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология. 2014. № 1. С. 118–121.
3. Жулин А. Г., Белова Л. В., Сидоренко О. В. Анализ методов снижения углекислоты на станциях обезжелезивания // Вестник Волгоградского государственного университета. Серия: Технические науки. 2019. № 3(5). С. 37–42.
4. Жулин А. Г., Белова Л. В., Перельгин Ю. П., Сидоренко О. В. Выбор влияющих факторов при десорбции углекислоты из подземной воды // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2021. № 5(749). С. 71–79.
5. Меженная О. Б. Совершенствование формы и определение размеров струйных аппаратов, формирующих протяженную водяную завесу // Вестник Го-

мельского государственного технического университета им. П. О. Сухого. 2007. № 3. С. 59–65.

6. Меженная О. Б. Закономерности аэрации воды струйными аппаратами, образующими протяженную куполообразную жидкостную завесу // Инновации в науке. 2015. № 48. С. 32–36.

7. Novosjolov M.G., Belkanova M.Y. Parametric Skeletal 3D Modeling of an Underground Water Aerator // Lecture Notes in Civil Engineering. 2022. Vol. 168. Pp. 473–482.

8. Новосёлов М. Г., Белканова М. Ю. Параметрическое каркасное твердотельное моделирование водоподготовительной установки в блочно-комплектном исполнении // Вестник ЮУрГУ. Серия: Строительство и архитектура. 2022. Т. 22, № 1. С. 52–62.

9. Есина М. Г. Приближенный способ расчета траектории струи // Актуальные вопросы совершенствования инженерных систем обеспечения пожарной безопасности объектов: сборник материалов V Всерос. научно-практ. конф., Иваново, 19 апреля 2018 года. Иваново, 2018. С. 172–175. EDN RZBFZX. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=37308426>

10. Чугаев Р. Р. Гидравлика. Л.: Энергоиздат, 1982. 672 с.

References

1. Dzyubo V. V., Alferova L. I. Otsenka sposobov degazacii-aeracii podzemnyh vod [Evaluation of methods of degassing-aeration of groundwater]. *Vodochistka. Vodopodgotovka. Vodosnabzhenie – Water purification. Water treatment. Water Supply*, 2008, no. 2(2), pp. 58–62.
2. Zhabina A. A., Kovalev S. A. Udalenie agressivnyh gazov podzemnyh vod metodom aerirovaniya [Removal of aggressive gases from groundwater by means of aeration]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya – Bulletin of Voronezh State University. Series: Geology* 2014, no. 1, pp. 118–121.
3. Zhulin A. G., Belova L. V., Sidorenko O. V. Analiz metodov snizheniya uglekisloty na stanciyah obezhelezivaniya [Analysis of methods of carbon dioxide reduction at deferrization stations]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskie nauki – Bulletin of Volgograd State University. Series: Technical Sciences*, 2019, no. 3(5), pp. 37–42.
4. Zhulin A. G., Belova L. V., Perelygin Yu. P., Sidorenko O. V. Vybory vliyayushchih faktorov pri desorbции uglekisloty iz podzemnoj vody [Choosing of influencing factors during desorption of carbon dioxide from groundwater]. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Stroitel'stvo – Proceedings of Higher Educational Institutions. Construction*, 2021, no. 5(749), pp. 71–79.
5. Mezhenная О. В. Sovershenstvovanie formy i opredelenie razmerov strujnyh apparatov, formiruyushchih protyazhennuyu vodyanuyu zavesu [Perfection of the

form and determination of dimensions of jet apparatuses forming an extended water curtain]. *Vestnik Gomel'skogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. P. O. Suhogo – Bulletin of Gomel State Technical University named after P. O. Sukhoi*, 2007, no. 3, pp. 59–65.

6. Mezhennaya O. B. *Zakonomernosti aeracii vody strujnymi apparatami, obrazuyushchimi protyazhennuyu kupoloobraznuyu zhidkostnuyu zavesu* [Regularities of water aeration by jet apparatuses forming an extended dome-shaped liquid veil]. *Innovatsii v nauke – Innovations in science*, 2015, no. 48, pp. 32–36.

7. Novosjolov M. G., Belkanova M. Y. Parametric Skeletal 3D Modeling of an Underground Water Aerator. *Lecture Notes in Civil Engineering*, 2022, vol. 168, pp. 473–482.

8. Novosjolov M. G., Belkanova M. Yu. *Parametricheskoe karkasnoe tverdotel'noe modelirovanie vodopodgotovitel'noj ustanovki v blochno-komplektnom ispolnenii* [Parametric

skeletal solid modeling of a water treatment plant in a block-unit design]. *Vestnik YuUrGU. Seriya «Stroitel'stvo i arhitektura» – SUSU Bulletin. Series “Construction and architecture”*, 2022, vol. 22, no. 1, pp. 52–62.

9. Esina M. G. *Priblizhennyj sposob rascheta traektorii strui* [Approximate method of calculating the trajectory of the jet]. *Trudy V Vserossijskoj nauchno-prakticheskoj konferencii, Ivanovo, 19 aprelya 2018 goda «Aktual'nye voprosy sovershenstvovaniya inzhenernyh sistem obespecheniya pozharnoj bezopasnosti ob'ektov»* [Proceedings of the V All-Russian scientific and practical conference, Ivanovo, April 19, 2018 “Actual issues of improving the engineering systems of fire safety of objects”]. Ivanovo, 2018, pp. 172–175. EDN RZBFZX. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=37308426>

10. Chugaev R. R. *Gidravlika* [Hydraulics]. Leningrad, Energoizdat Publ., 1982, 672 p.