УДК 628.2

© А. В. Малков, аспирант
(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет)
E-mail: malkov-anton@bk.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2017-14-3-160-165

© A. V. Malkov, post-graduate student
(Saint Petersburg State University of Architecture
and Civil Engineering)
E-mail: malkov-anton@bk.ru

РАСЧЕТ КОЛИЧЕСТВА ГАЗООБРАЗНОЙ СРЕДЫ, ДВИЖУЩЕЙСЯ В САМОТЕЧНЫХ КАНАЛИЗАЦИОННЫХ КОЛЛЕКТОРАХ ГЛУБОКОГО ЗАЛОЖЕНИЯ ПОД ДЕЙСТВИЕМ УВЛЕКАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ЖИДКОСТИ

CALCULATION OF THE AMOUNT OF GASEOUS MEDIUM MOVING IN GRAVITY SEWER LINES OF DEEP EMBEDDING UNDER THE INFLUENCE OF THE ENTRAINMENT ABILITY OF LIQUIDS

Описана теоретическая зависимость, позволяющая производить расчет количества газа, движущегося в подводящем пространстве канализационной сети, увлекаемого потоком жидкости в единицу времени в зависимости от различных параметров канализационной сети. Приведены численные значения полученных расчетов в сравнении с имеющимися экспериментальными данными. Сравнение показало хорошую сходимость результатов.

Ключевые слова: совместное движение, движение газа, увлекающая способность жидкости, двухфазное течение, совместное течение, газообмен.

The article describes the derivation of the theoretical dependence (equation) that allows calculating the amount of gas moving in the underwater space of the sewage network, entrained by the flow of liquid per unit of time, depending on various parameters of the sewage network. The numerical values of the obtained calculations are compared with the available experimental data. The comparison analysis shows a good convergence of the obtained results.

Keywords: joint motion, gas motion, entrainment ability of liquid, 2-phase flow, joint flow, gas exchange.

В канализационном коллекторе всегда идет двухфазное несмешиваемое движение веществ, находящихся в разных агрегатных состояниях (жидком и газообразном).

Движение сточной жидкости по коллекторам подробно рассмотрено в различных источниках [1, 2], является понятным физическим процессом и не требует дальнейшего разъяснения.

Движение газообразной среды в коллекторе происходит за счет [3]:

- увлекающей способности жидкости (рис. 1, эпюра 1). Сточная жидкость передает количество движения газообразной среде, тем самым вовлекая ее в движение вдоль коллектора по направлению течения жидкости. Данная сила является поверхностной силой. Более подробно данный вопрос рассмотрен ниже;

- разности удельного веса газа в порталах участка коллектора (рис. 1, эпюра 2), за счет которой возникает естественная тяга, потенциальная энергия давления переходит в кинетическую энергию потока газообразной среды, тем самым вовлекая ее в движение вдоль коллектора. Направление движения зависит от направления градиента давления. На рис. 1 направления движения потока газообразной среды за счет увлекающей способности жидкости и естественной тяги между порталами участка коллектора совпадают. Расчет количества газа, движущегося только за счет естественной тяги, представлен ранее [4].

При попутном направлении потоков газообразной среды, вовлеченной в движение за счет поверхностной и массовой сил соответствен-

но, эпюра распределения скоростей потока газообразной среды будет выглядеть как эпюра 3 (рис. 1).

Вопросам воздухообмена различных подземных пространств посвящено множество работ [5–9]. Но в отличие от канализационных тоннелей, в других подземных пространствах такой процесс, как увлечение газообразной среды потоком жидкости, не может иметь места.

Рассматривая вопрос увлечения газовой среды потоком жидкости в самотечных канализационных коллекторах, авторы в своих работах [10–12, 16] писали, что режим распределения скорости по сечению трубы может быть описан уравнением Навье–Стокса для установившегося движения следующего вида [13]:

$$\frac{dP}{dx} = \mu_2 \frac{d^2 U}{dy^2}, \quad (1)$$

где $\frac{dP}{dx}$ — изменение давления воздуха по оси движения, кг/м³; μ_2 — коэффициент динамической вязкости воздуха, Па · с; y — расстояние от поверхности жидкости до рассматриваемой точки, м; U — скорость вещества в рассматриваемой точке, м/с.

При интегрировании уравнения (1) были приняты граничные условия: при $y = 0$ $U = V_{в.пов}$ (осевая скорость течения жидкости на поверхности); при $y = h_b$ $U = 0$ (скорость на своде трубы).

В результате расчета получим эпюру распределения скоростей параболического вида (рис. 2).

В соответствии с полученными результатами была рассчитана эмпирическая формула для определения средней скорости газообразной среды, увлекаемой потоком жидкости [14]:

$$V_{в.ув} = \frac{\left(0,4 \frac{h}{D} + 0,82\right) V_{в.пов}}{2,8 \cdot Fr_B^{-0,6} + 1}. \quad (2)$$

В предлагаемом уравнении Навье–Стокса (1) в левой части уравнения $\frac{dP}{dx}$ обозначает изменение давления газовой среды по оси движения. Остается непонятным, почему в уравнении, описывающем количество воздуха, увлекаемого потоком жидкости, присутствует дифференциал изменения давления. Также не обосновывается принятие граничных условий интегрирования, не представлены границы применимости данной зависимости.

Процесс увлечения газовой среды потоком сточной жидкости можно математически описать при помощи закона вязкости Ньютона, который описывает процесс передачи количества движения от движущейся пластины к жидкости [15]:

$$\frac{F}{A} = \mu \frac{V}{y}, \quad (3)$$

где F — сила, приложенная к увлекаемому потоку, кг/(м · с²); A — поверхность соприкосновения двух несмешивающихся потоков, м²; μ — динамическая вязкость увлекаемого потока, Па · с; V — скорость увлекаемого потока на расстоянии y от поверхности раздела двух фаз, м/с;

Рис. 1. Расчетная схема с учетом движения газообразной среды: 1 — эпюра распределения скоростей газообразной среды, движущейся за счет увлекающей способности жидкости; 2 — эпюра распределения скоростей газообразной среды, движущейся за счет разности удельного веса газа между двумя порталами участка коллектора; 3 — эпюра распределения скоростей газообразной среды, движущейся за счет увлекающей способности жидкости и разности удельного веса газа между двумя порталами участка коллектора

Рис. 2. Эпюра распределения скорости в газообразной среде и водном потоке по уравнению (1)

y — расстояние между поверхностью раздела двух фаз и увлекаемым потоком, м.

Движущаяся сточная жидкость в направлении оси x со скоростью V передает газообразной среде некоторое количество движения, в результате чего в газообразной среде устанавливается стационарный профиль скорости (рис. 3).

Из уравнения (3) видно, что скорость течения слоя уменьшается пропорционально увеличению расстояния y . Коэффициент пропорциональности μ называется коэффициентом динамической вязкости или просто динамической вязкостью вещества.

Для дальнейшего изложения полезно переписать уравнение (3) в более полном виде. Касательное напряжение, прилагаемое в направлении x к поверхности слоя жидкости, расположенного на расстоянии y от поверхности жидкости, обозначим через τ_{xy} , а компонент вектора скорости жидкости по координате x — через U_x :

$$\tau_{xy} = -\mu \frac{dU_x}{dy}, \quad (4)$$

где τ_{xy} — касательное напряжение, Па; μ — динамическая вязкость потока газа, Па · с.

Интегрируя последнее уравнение, получим

$$U_x = \left(-\frac{\tau_{xy}}{\mu} \right) y + C. \quad (5)$$

Для определения константы интегрирования воспользуемся следующим граничным условием (перенос количества движения происходит без скачка на границе раздела двух фаз) [15]:

$$\text{при } y = 0 \quad U_x = V_{\text{в.пов.}} \quad (6)$$

Перепишем уравнение (5):

$$U_x = \left(-\frac{\tau_{xy}}{\mu} \right) y + V_{\text{в.пов.}} \quad (7)$$

Для определения распределения скорости потока газообразной среды, увлекаемой потоком движущейся жидкости, необходимо знать распределение количества движения, передаваемого от движущейся сточной жидкости газообраз-

Рис. 3. Формирование стационарного профиля скорости газообразной среды, увлекаемого движущейся сточной жидкостью

ной среде (рис. 4):

$$\frac{F}{A} = \tau_{xy}^{\text{II}} = \rho g h_i, \quad (8)$$

где τ_{xy}^{II} — касательное напряжение увлекаемого потока, Па; ρ — плотность увлекаемого потока, кг/м³; h_i — потери по длине, м.

Уравнение (8) примет следующий вид:

$$\frac{F}{A} = \tau_{xy}^{\text{II}} = \rho g h_i. \quad (9)$$

Уравнение (7) примет следующий вид:

$$U_x^{\text{II}} = V_{\text{в.пов}} - \frac{\rho g h_i}{\mu^{\text{II}}} y. \quad (10)$$

Уравнение (10) описывает распределение скорости течения газообразной среды по оси y , движущейся по самотечному коллектору вдоль оси x под действием только увлекающей способности жидкости, где U_x^{II} — скорость газообразной среды в рассматриваемой точке, м/с; $V_{\text{в.пов}}$ — скорость сточной жидкости на поверхности, м/с; ρ — плотность газообразной среды, кг/м³; g — ускорение свободного падения, м/с²; h_i — потери по длине, м; μ^{II} — коэффициент динамической вязкости газообразной среды, Па · с; y — расстояние от поверхности жидкости до рассматриваемой точки, м.

При этом количество газообразной среды, увлекаемое потоком жидкости, для самотечного канализационного коллектора, не имеющего на своем пути местных сопротивлений, будет равно, м³/с,

$$Q_{\text{г}} = \frac{V_{\text{в.пов}}^2 d \mu^{\text{II}}}{2 \rho g h_i}, \quad (11)$$

где d — ширина поверхности сопряжения сточ-

ной жидкости и газообразной среды, м.

При написании формулы было принято одно допущение: скорость сточной жидкости на поверхности потока одинаковая по ширине коллектора.

Данная теоретическая формула учитывает все факторы, влияющие на количество увлекаемой газообразной среды потоком жидкости, такие как степень заполнения коллектора, поверхностная скорость течения жидкости, площадь соприкосновения двух фаз, геометрический уклон, плотность и динамическая вязкость газообразной среды.

Проверка размерности:

$$Q_{\text{г}} = \frac{1 \frac{\text{м}^2}{\text{с}^2} \cdot 1 \text{ м} \cdot 1 \text{ Па} \cdot \text{с}}{1 \text{ Па}} = 1 \frac{\text{м}^3}{\text{с}}. \quad (12)$$

Уравнение позволяет определять количество газообразной среды, движущейся в подсводном пространстве канализационного коллектора под действием увлекающей способности сточной жидкости.

Результаты расчета по формуле (11) сравнили с данными, полученными В. М. Васильевым при проведении экспериментов в 1982 г. [12]. Сравнение экспериментальных данных и результатов расчета, полученных по зависимостям (11), представлено в таблице.

Выводы

Результаты расчетов количества газообразной среды, движущейся в самотечных канализационных коллекторах глубокого заложения

Рис. 4. Эпюры распределения скорости и передачи количества движения в газообразной среде и водном потоке согласно закону вязкости Ньютона

Сравнение экспериментальных и расчетных данных

Диаметр коллектора $D_{\text{кол}} = 1400$ мм, уклон $i = 0,001$ мм/м, длина рассматриваемого участка $L = 500$ м				
Экспериментальные данные [12]				Результаты расчета по ф-ле (11)
Период проведения эксперимента	Заполнение канализационного коллектора h/D	Скорость, м/с		
		течения сточной жидкости $V_{\text{ж.пов}}$	течения газа под действием потока сточной жидкости $V_{\text{в.ув}}$	течения газа под действием потока сточной жидкости $V_{\text{в.ув}}$
Апрель 1982 года	0,40	1,75	0,26	0,27
	0,37	1,72	0,24	0,25
	0,68	1,88	0,45	0,44
	0,50	1,82	0,33	0,34
	0,42	1,78	0,28	0,29
	0,34	1,70	0,23	0,24
	0,55	1,84	0,36	0,37
Октябрь 1982 года	0,26	1,40	0,14	0,14
	0,74	1,90	0,52	0,47
	0,65	1,85	0,42	0,42
	0,44	1,75	0,28	0,27
	0,66	1,88	0,44	0,44
	0,37	1,74	0,24	0,24

под действием увлекающей способности жидкости, полученные по формуле (11), показывают хорошую сходимость с экспериментальными данными, полученными на кафедре гидравлики СПбГАСУ под руководством проф., д-ра техн. наук В. М. Васильева. Относительная погрешность в 70 % случаев составила менее 9 %. Зависимость (11) можно применять для расчета количества газа, движущегося по канализационному коллектору под действием увлекающей способности жидкости.

Библиографический список

1. Чугаев Р. Р. Гидравлика. Л.: Стройиздат, 2008. 672 с.
2. Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа. 7-е изд., испр. М.: Дрофа, 2003. 840 с.
3. Малков А. В. Расчет количества газообразной среды, движущейся по канализационной сети под действием увлекающей способности жидкости и разности давления на концах расчетного участка (естественная тяга) // Вестник гражданских инженеров. 2016. № 5 (58). С. 115–119.
4. Малков А. В. Теоретическое исследование, расчет количества газообразной среды, движущейся в самотечном канализационном коллекторе глубокого заложения под действием разности давления на концах расчетного участка (естественная тяга) // Вестник гражданских инженеров. 2016. № 4 (57). С. 140–144.
5. Клебанов Ф. С. Воздух в шахте. М.: Изд. дом «Имидж», 1995. 574 с.
6. Казаков Б. П. Особенности развития и пути совершенствования систем вентиляции калийных рудников // Материалы науч. сессии Горного института УРОРАН. Пермь: Уральское отделение Российской академии наук, 2004. С. 218.
7. Шувалов Ю. В., Гендлер С. Г., Сметанин М. М., Павлов И. А., Смирняков В. В. Вентиляция шахт, рудников и подземных сооружений: учеб. пособие. СПб.: Санкт-Петербургский государственный горный институт, 2007. 159 с.
8. Красюк А. М. Тоннельная вентиляция метрополитенов. Новосибирск: Наука, 2006. 163 с.
9. Фомичев В. И. Вентиляция тоннелей и подземных сооружений. Л.: Стройиздат, 1991. 200 с.
10. Васильев В. М. Почему необходимо вентилировать канализационные коллекторы // Подземное пространство мира. 1993. № 5–6. С. 33–35.
11. Васильев В. М. Исследование методов вентиляции и ее необходимости при проектировании глубоководных коллекторов: отчет о НИР. Л.: ЛИСИ, 1979. 34 с. № ГР 378 1076.
12. Васильев В. М. Повышение эффективности работы канализационных коллекторов и сооружений

на них при совместном движении сточных вод и газов: дис. ... д-ра техн. наук. СПб., 1996. 343 с.

13. Мартинсон Л. Н., Малов Ю. И. Дифференциальные уравнения математической физики / под ред. А. И. Зарубина, А. П. Крищенко. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2006. 367 с.

14. Васильев В. М. К расчету естественной тяги канализационных коллекторов // Подземное пространство мира. 1994. № 1. 131 с.

15. Берд Р., Стьюарт В., Лайтфут Е. Явление переноса. М.: Химия, 1974. 688 с.

16. Гайфутдинов М. Г. Взаимное движение сточных вод и газов в канализационных коллекторах и мероприятия по предотвращению газовой коррозии: дис. ... канд. техн. наук. Л., 1985. 23 с.

References

1. Chugaev R. R. *Gidravlika* [Hydraulics]. Leningrad, Stroyizdat Publ., 2008, 672 p.

2. Loytsyanskiy L. G. *Mekhanika zhidkosti i gaza* [Mechanics of liquid and gas]. 7-th edition, revised. Moscow, Drofa Publ., 2003, 840 p.

3. Malkov A. V. *Raschet kolichestva gazoobraznoy sredy, dvizhushcheysya po kanalizatsionnoy seti pod deystviem uvlekayushchey sposobnosti zhidkosti i raznosti davleniya na kotsakh raschetnogo uchastka (estestvennaya tyaga)* [Calculation of the amount of gas moving in sewer network under the action of leading ability of the fluid and the pressure difference across the ends of the settlement area (natural draft)]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2016, no. 5 (58), pp. 115–119.

4. Malkov A. V. *Teoreticheskoe issledovanie, raschet kolichestva gazoobraznoy sredy, dvizhushcheysya v samotechnom kanalizatsionnom kollektore glubokogo zalozheniya pod deystviem raznosti davleniya na kotsakh raschetnogo uchastka (estestvennaya tyaga)* [Theoretical research, calculation of the amount of the gaseous medium moving in gravity deep level sewers by the pressure difference at the ends of the gage section (natural draft)]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2016, no. 4 (57), pp. 140–144.

5. Klebanov F. S. *Vozdukh v shakhte* [The air in the mine]. Moscow, Imidzh Publ., 1995, 574 p.

6. Kazakov B. P. *Osobennosti razvitiya i puti sovershenstvovaniya sistem ventilyatsii kaliynykh rudnikov* [The features of development and the ways of improvement of the ventilation systems in potash mines]. *Trudy nauch. sessii*

Gornogo instituta URORAN [Proc. of the sci. session of the Mining Institute URORAN]. Perm, Ural branch of the RAN Publ., 2004, 218 p.

7. Shuvalov Yu. V., et al. *Ventilyatsiya shakht, rudnikov i podzemnykh sooruzheniy*. Ucheb. Posobie [Ventilation in mines, diggings, and underground structures]. St. Petersburg, St. Petersburg Mining University Publ., 2007, 159 p.

8. Krasnyuk A. M. *Tonnel'naya ventilyatsiya metropolitenov* [Tunnel ventilation in the subway]. Novosibirsk, Nauka Publ., 2006, 163 p.

9. Fomichev V. I. *Ventilyatsiya tonneley i podzemnykh sooruzheniy* [Ventilation of tunnels and underground structures]. Leningrad, Stroyizdat Publ., 1991, 200 p.

10. Vasil'ev V. M. *Pochemu neobkhodimo ventilirovat' kanalizatsionnye kollektory* [Why it is necessary to ventilate the sewage collector]. *Podzemnoe prostranstvo mira – Underground space in the world*, 1993. no. 5–6, pp. 33–35.

11. Vasil'ev V. M. *Issledovanie metodov ventilyatsii i ee neobkhodimosti pri proektirovanii glubokozalozhennykh kollektorov. Otchet o NIR* [Research of the methods of ventilation and its necessity at design of deep embedded sewage collectors. Report on R&D]. Leningrad, LISI Publ., 1979, 34 p, no. GR 378 1076.

12. Vasil'ev V. M. *Povyshenie effektivnosti raboty kanalizatsionnykh kollektorov i sooruzheniy na nikh pri sovmestnom dvizhenii stochnykh vod i gazov: diss. dokt. tekhn. nauk* [Improvement of the performance efficiency of the sewage collectors and structures at joint motion of wastewater and gasses. Dr. Sci. Tech. diss.]. St. Petersburg, 1996, 343 p.

13. Martinson L. N., Malov Yu. I. *Differentsial'nye uravneniya matematicheskoy fiziki* [Differential equations of mathematical physics]. Ed. by Zarubin A. I., Krishchenko A. P. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2006, 367 p.

14. Vasil'ev V. M. *K raschetu estestvennoy tyagi kanalizatsionnykh kollektorov* [About the calculation of the natural draft in sewage collectors]. *Podzemnoe prostranstvo mira – Underground space in the world*, 1994. no. 1, 135 p.

15. Berd R., St'yuart V., Laytut E. *Yavlenie perenos* [The transfer phenomenon]. Moscow, Khimiya Publ., 1974, 688 p.

16. Gayfutdinov M. G. *Vzaimnoe dvizhenie stochnykh vod i gazov v kanalizatsionnykh kollektorakh i meropriyatiya po predotvrashcheniyu gazovoy korrozii. Diss. kand. tekhn. nauk* [Joint motion of waste water and gasses in sewage collectors and actions aimed at prevention of gas corrosion. PhD in Sci. Tech. diss.]. Leningrad, 1985, 23 p.