УДК 628.31

© С. В. Федоров, канд. техн. наук, доцент

© В. М. Васильев, д-р техн. наук, профессор

(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет,
Санкт-Петербург, Россия)

E-mail: svyatoslavfedorov@mail.ru, 89119311522@bk.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2021-18-2-158-165

© S. V. Fedorov, PhD in Sci. Tech., Associate Professor

© V. M. Vasilyev, Dr. Sci. Tech., Professor

(Saint Petersburg State University
of Architecture and Civil Engineering,
St. Petersburg, Russia)

E-mail: svyatoslavfedorov@mail.ru, 89119311522@bk.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЮКЕРА С ВОЗДУШНОЙ ПОДУШКОЙ

SIMULATION OF AN AIR CUSHION INVERTED SIPHON

Рассмотрена проблема заиливания канализационных дюкеров. Выполнен обзор современных методов гидравлической промывки. Для обеспечения надежной и энергоэффективной работы дюкера предлагается использовать эффект «воздушной подушки». Для подтверждения устойчивой работы сооружения выполнено моделирование установки дюкера, состоящее из двух участков с узлами для приемки стока от перепадных стояков, узлом, обеспечивающим отведение воды, и узлом регулирования давления в воздушной подушке. В результате моделирования получено распределение объемной доли водной и газовой фаз, распределение давления в горизонтальных и вертикальных трубопроводах дюкера, значения скорости потока при формировании воздушной подушки. Применение разделительных перегородок на концах горизонтальных трубопроводов дюкера позволяет создать автономные воздушные подушки и осуществлять регулирование работы для каждого участка отдельно. Перспективна адаптация технологии дюкера с воздушной подушкой применительно к системе магистральной канализации.

Ключевые слова: дюкер, заиливание, промывка, воздушная подушка, моделирование.

The article considers the problem of silting-up of sewage inverted siphons. A review of modern methods of hydraulic flushing is presented. To ensure reliable and energy-efficient operation of the inverted siphon, it is proposed to use the air cushion effect. To ensure the stable operation of the structure, a simulation of the inverted siphon installation was performed, consisting of two sections with nodes for receiving runoff from the drop risers, a node that provides water removal and a node for regulating the pressure in the air cushion. As a result of the simulation, there has been obtained the distribution of the volume fraction of the water phase and the gas phase, the pressure distribution in the horizontal and vertical inverted siphon pipelines and the values of the flow velocity during the formation of the air cushion. The use of separation partition walls at the ends of horizontal siphon pipelines allows creating autonomous air cushions and regulating the work for each section separately. The adaptation of the air cushion inverted siphon technology in relation to the main sewer system is considered to be promising.

Keywords: inverted siphon, silting-up, flushing, air cushion, simulation.

Система городской канализации представляет собой сложный комплекс сооружений, предназначенный для сбора и транспортировки токсичных и санитарно-опасных стоков. Работа всех сооружений взаимосвязана, и надежность системы в целом, безусловно, зависит от эффективной работы каждого индивидуально.

Одними из важнейших технологических объектов системы канализации являются дюкеры, которые встречаются достаточно часто и представляют собой участки сети, прокладываемые под различными топографическими препят-

ствиями (реками, оврагами, транспортными магистралями и т. п.) и работающие в напорном или напорно-самотечном режиме. В случае напорно-самотечного режима поток движется полным сечением по U-образному трубопроводу за счет разницы отметок воды в подводящем и отводящем от дюкера трубопроводах самотечной канализации. Поток на выходе из сооружения движется по восходящему трубопроводу, что является причиной постоянного заиливания лотка и в последствии полного засорения [1, 2]. Такой гидравлический режим крайне

ненадежный, поэтому для обеспечения бесперебойной работы системы канализации требуются устройства резервных ниток на случай аварии и дополнительные сооружения, чтобы выполнить промывочные работы. Для решения проблемы заиливания проводились лабораторные эксперименты по определению минимальных скоростей самоочищения, обеспечивающие предотвращение осаждения осадка в наклонных вверх и вертикальных трубах канализационных дюкеров [3]. Эти исследования позволили получить зависимости для прогнозирования скоростей самоочищения с учетом размера трубы, размера частиц осадка, его концентрации и уклона трубы. В странах Европы, США и Канаде применяются современные методы гидравлической промывки дюкеров, которые основаны на кратковременной подаче большого количества воды, накопленного ранее в сети [4]. Для накопления требуемого объема воды используются гидравлические ворота [5] или вакуумно-промывочные устройства [6]. В результате этого образуется сильная волна [7, 8], которая размывает накопившийся осадок и транспортирует его в сеть ниже по течению либо в приямок для дальнейшей откачки илососом. Также вызывает интерес технология, обеспечивающая промывку дюкера за счет устройства специального щита в колодце за дюкером по ходу течения, который в закрытом состоянии осуществляет подпор сточных вод. При дальнейшем открытии щита осуществляется опорожнение колодца с большой скоростью, побуждающее движение воды, находящейся в U-образном трубопроводе дюкера. Вместе с удаляемой из дюкера водой устраняется скопившийся в нем осадок [9].

Проблема заиливания участков сети дюкерного типа может быть решена с помощью применения эффекта «воздушной подушки». В этой области известна конструкция [10, 11], которая позволяет создать расслоенное течение двухфазного потока, когда в нижней части трубы находится сточная жидкость, а в верхней части газовоздушная среда под избыточным давлением. Эта конструкция позволяет осуществлять регулирование скорости движения сточной жидкости и удаление скопившегося осадка в условиях переменного расхода жидкости по длине трубопровода дюкера. Регулирование скорости дости-

гается за счет нагнетания воздуха в подводящее пространство и отжатия потока сточной жидкости воздушной подушкой.

Кроме этого, известны конструкции подобных дюкеров за рубежом, которые уже находятся в эксплуатации и показали высокую эффективность эксплуатации [12]. Воздушная подушка в существующих конструкциях создается с помощью работы компрессора, а стравливается с помощью отводящего трубопровода, снабженного шиберным затвором.

Применение эффекта воздушной подушки в отечественной практике проектирования и строительства канализационных сетей является перспективным направлением, поскольку позволит упростить процесс промывки дюкера, не останавливая пропуск сточных вод. Кроме компрессора, формирование воздушной подушки может быть достигнуто с помощью эжектирующей способности трубчатого стояка. В процессе падения поток воды создает вакуумметрическое давление за собой, которое вызывает подсос газовоздушной среды в стояк. Модельные расчеты участков канализационной сети [13] и экспериментальные исследования показывают, что перепадные шахты играют роль компрессора, вызывая нагнетание газовоздушной среды в коллекторы глубокого заложения [14]. В результате этого в нижнем бьефе перепадной шахты наблюдается избыточное давление газовоздушной среды.

Для наглядности рассмотрения работы трубчатого стояка рассмотрим результаты моделирования в программе *ANSYS CFX* (рис. 1). Модель включает в себя подводящий трубопровод диаметром 0,1 м, от которого вода с расходом $Q_{\text{water}} = 4,6$ л/с поступает в трубчатый стояк диаметром 0,05 м и высотой 2 м. У стояка сверху предусматривается вентиляционный патрубок диаметром 0,1 м. Из стояка вода поступает в закрытый сосуд размерами в плане 0,7×0,6 м и высотой 1,2 м. В начальный момент времени сосуд полностью заполнен водой. Избыток воды покидает сосуд по вертикальному трубопроводу, из которого поступает в канал, сообщающийся с атмосферой.

Расчетное время протекания воды через сосуд составило 10 мин. В результате падения жидкости в вентиляционном патрубке трубчатого стояка зафиксировано вакуумметрическое давление $P_{\text{вак}} = 445$ Па. За счет этого наблюда-

Рис. 1. Результаты моделирования процесса эжектирования воздуха трубчатым стояком:
 а — 0 с; б — 20 с; в — 200 с; г — 600 с

ется эжектирование воздуха в закрытый сосуд с расходом воздуха $Q_{air} = 1$ л/с. С течением времени в сосуде начинает образовываться воздушная подушка, которая постепенно разрастается и понижает уровень воды в сосуде. Понижение продолжится до момента выравнивания его с краем водоотводящей трубы, после чего порции накопленного воздуха покидают сосуд вместе с водой. В водоотводящей трубе наблюдается эффект эрлифта, вызывающий подъем уровня воды в отводном канале, за счет подъема

менее плотного перемешанного с воздухом потока воды. Для оценки времени формирования воздушной подушки может быть использовано уравнение Менделеева–Клапейрона с учетом известного подпора и производительности стояков по расходу. В рассмотренном модельном расчете период формирования подушки получился более длительным, чем при оценочном расчете, что объясняется близким расположением водоотводящей трубы к трубчатому стояку и выносом

значительного количества растворенного воздуха сразу за пределы сосуда.

Для организации участка сети с воздушной подушкой кроме устройства трубчатого стояка также необходимо предусмотреть устройство дополнительного оборудования, обеспечивающего управление сооружением (рис. 2). По схеме поток сточных вод поступает в дюкер по подводящему самотечному коллектору 1 в трубчатый стояк 2, которые располагаются в перепадной шахте 3. По трубчатому стояку поток падает вниз в водобойный колодец 4 шахты, транспортируя в нижний бьеф порции газовоздушной смеси. В качестве источника рабочей среды воздушной подушки может быть использована газовоздушная среда канализационной сети верхнего бьефа [15], либо организована специальная вентиляция в шахте 3, обеспечивающая забор свежего воздуха из окружающей среды. Из водобойного колодца 4 поджатый воздушной подушкой поток движется по коллектору глубокого заложения 5 в подъемную шахту 14, достигнув которую, поток поступает в трубопровод подъема сточных вод 6 и подается в напорном режиме вверх в водобойный колодец 13, откуда покидает дюкер по отводящему самотечному коллектору 15. Для управления воздушной подушкой в шахте 14 устроен трубопровод для стравливания газовой среды 9, на котором устанавливается перепускной клапан регулирования давления 8.

Регулируя клапан 8, можно управлять заполнением коллектора 5 и скоростью протекания воды, устанавливая тем самым штатный режим работы или режим промывки дюкера.

При промывке коллектора осадок смывается в подъемную шахту, в которой предусматривается приямок для накопления осадка 10. Опорожнение приямка выполняется с помощью трубопровода удаления осадка 11. По данному трубопроводу осадок подается в самотечный коллектор 15. Однако, кроме этого варианта, удаление осадка может быть организовано в специальный контейнер с дальнейшим вывозом на полигон. Удаление осадка сопровождается открытием задвижки 12 и дополнительным регулированием задвижки 7.

Устойчивая работа дюкера с воздушной подушкой, которая обеспечивается с помощью перепадных стояков, была оценена с помощью выполнения модельного расчета в ANSYS CFX. В соответствии с основными технологическими особенностями была спроектирована установка канализационной сети дюкерного типа, включающей в себя два участка магистрального коллектора диаметром $d_y = 140$ мм и длиной $l = 2$ м (рис. 3). В магистральный коллектор вода поступает из вышерасположенной канализации по трубчатым стоякам $d_y = 50$ мм и высотой 2 м. Для приема воды от стояков на магистральном трубопроводе устраиваются узлы № 1 и № 2,

Рис. 2. Принципиальная схема участка канализационной сети дюкерного типа

которые оснащены водобойными колодцами и разделительными стенками между стояками. В каждом узле один стояк предназначен для пропуска сухого расхода хозяйственно-бытовых сточных вод, а второй необходим для пропуска дополнительного дождевого расхода. В данном моделировании предусматривалась работа всех стояков. Пройдя горизонтальные участки, вода попадает в подъемный узел № 3, откуда по вертикальному трубопроводу длиной $l = 2$ м поднимается и уходит в самотечную канализацию. Также от узла № 3 выполняется ответвление магистрального коллектора для подключения узла № 4, который предназначен для стравливания избыточного воздуха. Для этого в нем предусматривается вертикальный трубопровод $d_y = 20$ мм и $l = 2$ м. Важно отметить, что магистральные участки разделены перегородкой и аэродинамически не связаны между собой.

Далее рассмотрим начальные и граничные условия. Источниками воды являются два напорных трубопровода, которые подают воду в разгрузочные резервуары А и В. В качестве гра-

ничного условия входа задается значение скорости. Для первого трубопровода она принята 1,7 м/с, а для второго 0,85 м/с. Для потолка резервуаров А и В, верхних граней распределительных каналов и вентиляционных патрубков перепадных стояков устанавливается граничное условие атмосферы с избыточным давлением $P_{изб} = 0$ Па. Также аналогичное условие атмосферы задано для верхней грани на отводящем трубопроводе в узле № 3. Граничное условие выхода назначается для отводящего трубопровода $d_y = 140$ мм со значением избыточного давления $P_{изб} = 0$ Па. Кроме этого, условие выхода устанавливается для трубопровода отвода избыточного воздуха в узле № 4. В начальный момент времени этот трубопровод не работает, а начинает отводить воздух спустя 100 с, когда сформируется воздушная подушка. Пропускная способность трубопровода соответствует суммарному расходу воздуха, который нагнетается стояками на втором участке и равна $Q = 0,4$ л/с. Общее время модельного расчета составило 120 с. В начальный момент

Рис. 3. Граничные условия для модели дюкера с воздушной подушкой

времени дюкер заполнен водой. Уровень воды соответствует лотку отводящего коллектора.

В качестве результата моделирования было получено распределение объемных долей водного и газового потоков в расчетной области модели (рис. 4). В результате сброса водного потока по стоякам наблюдается ожидаемый эффект. В результате накопления воздушной среды происходит отжатие начального слоя воды в дюкере и в подсводном пространстве узлов и трубопроводов наблюдается формирование воздушной подушки. За счет превалирования расхода воды, поступающей в узел № 2 ($Q = 3,3$ л/с), над расходом воды, поступающей в узел № 1 ($Q = 1,6$ л/с), воздушная подушка на горизонтальном участке № 2 формируется быстрее, чем на участке № 1.

Граничное условие по удалению воздуха из воздушной подушки работает адекватно. С мо-

мента времени $t = 100$ с уровень воды на участке № 2 перестает снижаться и поддерживается в одном положении. Наибольшее давление водной и газовой фазы зафиксировано в горизонтальных трубопроводах дюкера $P_{изб} = 18\,266$ Па. В подающих стояках наблюдается градиент давления по высоте. Давление в стояках изменяется от наибольшего значения на выходе в магистральный трубопровод $P_{изб} = 18\,266$ Па до минимального вакуумметрического давления на вентиляционном патрубке $P_{вак} = 1706$ Па. Аналогичное распределение давления наблюдается на вертикальном отводящем трубопроводе в узле № 3, лишь с той разницей, что в верхней части трубопровода присутствует избыточное давление $P_{изб} = 2039$ Па, под действием которого поток воды изливается и покидает дюкер по самотечному трубопроводу.

Рис. 4. Результат моделирования дюкера с воздушной подушкой: а — $t = 0$ с; б — $t = 120$ с

За счет перегородок в узлах на двух участках трубопроводов формируются независимые друг от друга воздушные подушки. На первом участке протекает расход воды 1,6 л/с, а на втором — 4,9 л/с. Скорость воды на участках при полном заполнении трубопроводов дюкера составила 0,11 и 0,32 м/с. При создании воздушной подушки, занимающей 1/3 сечения трубы, скорость водного потока возрастает в 1,4 раза, при отжатии потока на половину сечения скорость потока возрастает в 2 раза, а при снижении уровня воды на 2/3 сечения обеспечивается рост скорости в 3,4 раза.

Заключение

Результаты моделирования подтверждают устойчивую работу дюкера с воздушной подушкой, которая позволяет создать необходимую промывочную скорость потока. Формирование подушки достаточно быстро обеспечивается работой перепадного стояка. За счет этого применение конструкции дюкера с воздушной подушкой может быть эффективно применено в целом для системы магистральной канализации. Устройство перегородок в смотровых шахтах и узлов регулирования воздушной подушки позволит локально регулировать скорость протекания и выводить на режим промывки отдельные участки коллектора. Кроме этого, использование воздушной подушки позволит централизованно под давлением отводить загрязненную газоздушную смесь на очистную установку. Предлагаемая конструкция характеризуется простотой, легко эксплуатируется и является энергоэффективной, что позволит повысить надежность функционирования не только дюкера, но и системы канализации в целом.

Библиографический список

1. May R. W. P. Hydraulic design of inverted siphons for sewers / HR Wallingford Rep. 2000. No. SR 559, Wallingford, England.
2. Miles J. R., Breen C., Coyle B., & Morris K. Solving Operational Problems with Inverted Siphons. Retrieved from https://www.waternz.org.nz/Attachment?Action=Download&Attachment_id=1343
3. May R. W. P. Preventing Sediment Deposition in Inverted Sewer Siphons // Journal of hydraulic engineering. 2003. Pp. 283–290.
4. Mahmood Shafai Bajestan, Mohammad Nasre-Esfahani, Sediment Flushing Criteria from Inverted

Siphon Structures // Journal of Applied Sciences. 2007. № 7(5). Pp. 695–702.

5. Bertrand-Krajewski J.-L., Bardin J.-P., Gibello C., Laplace D. Hydraulics of a sewer flushing gate // Water Science & Technology. 2003. 47(4). Pp. 129–136.

6. Qizhong Guo, Chi-Yuan Fan, Ramjee Raghaven, Richard Field Gate and Vacuum Flushing of Sewer Sediment: Laboratory Testing // Journal of Hydraulic Engineering. 2004. № 130 (5). Pp. 463–466.

7. Todeschini S., Ciaponi C., Papiri S. Laboratory investigation on the effects of flushes on cohesive sediment beds // Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics. 2010. № 4 (3). Pp. 365–373.

8. Campisano A., Creaco E., Modica C. Laboratory investigation on the effects of flushes on cohesive sediment beds // Urban Water Journal. 2008. № 5 (1). Pp. 3–14.

9. CN103628562A Impounding self-flushing device for drainage inverted siphon / Zhu Longlong; Application filed by Yantai Water Taihe Water Technology Co., Ltd. – Priority to CN201210306663.7A 2014-03-12; Publication of CN103628562A 2016-05-11. 8 p.

10. Пат. 2107782C1, МПК E 03 F 5/20 Российская Федерация. Канализационный дюкер / Васильев В. М.; заявитель и патентообладатель Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет. – № 95120853/03; заявл. 09.12.95; опубл. 27.03.98. 8 с.

11. Vasilyev V., Vasilyev F. Innovations in Saint Petersburg's 12 km siphon sewer, Russia // Proceedings of institution of civil engineers: waste and resource management. 2016. № 1. Pp. 42–51.

12. Hans-Burkhard Horlacher, Ulf Helbig Rohrleitungen 2: Einsatz, Verlegung, Berechnung, Rehabilitation // Springer Vieweg. 2018. 1187/1174.

13. Федоров С. В., Васильев В. М., Столбихин Ю. В., Черников Н. А. Разработка мероприятий по снижению загазованности канализационной сети // Вестник гражданских инженеров. 2019. № 5 (76). С. 175–181.

14. Shuai Guo, Yu Qian, David Z. Zhu, Wenming Zhang. Effects of Drop Structures and Pump Station on Sewer Air Pressure and Hydrogen Sulfide: Field Investigation // Journal of Environmental Engineering. 2018. № 144 (3). Pp. 04018011-1-9.

15. Федоров С. В., Васильев В. М., Клементьев М. Н. Исследование газовой выделения на участке канализационной сети // Водоснабжение и санитарная техника. 2019. № 5. С. 54–60.

References

1. May R. W. P. Hydraulic design of inverted siphons for sewers. HR Wallingford Rep., 2000, no. SR 559, Wallingford, England.

2. Miles J. R., Breen C., Coyle B., & Morris K. *Solving operational problems with inverted siphons*. Available at: https://www.waternz.org.nz/Attachment?Action=Download&Attachment_id=1343
3. May R. W. P. Preventing sediment deposition in inverted sewer siphons. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2003, pp. 283–290.
4. Mahmood Shafai Bajestan, Mohammad Nasr-e-Esfahani. Sediment flushing criteria from inverted siphon structures. *Journal of Applied Sciences*, 2007, no. 7(5), pp. 695–702.
5. Bertrand-Krajewski J.-L., Bardin J.-P., Gibello C., Laplace D. Hydraulics of a sewer flushing gate. *Water Science & Technology*, 2003, no. 47(4), pp. 129–136.
6. Qizhong Guo, Chi-Yuan Fan, Ramjee Raghaven, Richard Field. Gate and vacuum flushing of sewer sediment: laboratory testing. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2004, no. 130 (5), pp. 463–466.
7. Todeschini S., Ciaponi C., Papiri S. Laboratory investigation on the effects of flushes on cohesive sediment beds. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 2010, no. 4 (3), pp. 365–373.
8. Campisano A., Creaco E., Modica C. Laboratory investigation on the effects of flushes on cohesive sediment beds. *Urban Water Journal*, 2008, no. 5 (1), pp. 3–14.
9. CN103628562A Impounding self-flushing device for drainage inverted siphon. Zhu Longlong; Application filed by Yantai Water Taihe Water Technology Co., Ltd. – Priority to CN201210306663.7A 2014-03-12; Publication of CN103628562A 2016-05-11, 8 p.
10. Vasil'ev V. M. *Kanalizatsionnyy dyuker* [Sewage inverted siphon]. Patent RF, no. 95120853/03, MPK E 03 F 5/20, 1998, Saint-Petersburg, Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering Publ., 8 p.
11. Vasilyev V., Vasilyev F. *Innovations in Saint Petersburg's 12 km siphon sewer, Russia*. Proceedings of institution of civil engineers: waste and resource management, 2016, no. 1, pp. 42–51.
12. Hans-Burkhard Horlacher, Ulf Helbig. *Rohrleitungen 2: Einsatz, Verlegung, Berechnung, Rehabilitation*. Springer Vieweg, 2018, 1187/1174.
13. Fedorov S. V., Vasil'ev V. M., Stolibikhin Yu. V., Chernikov N. A. *Razrabotka meropriyatiy po snizheniyu zagazovannosti kanalizatsionnoy seti* [Development of measures to reduce gas contamination of the sewer network]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2019, no. 5 (76), pp. 175–181.
14. Shuai Guo, Yu Qian, David Z., Wenming Zhang. Effects of drop structures and pump station on sewer air pressure and hydrogen sulfide: field investigation. *Journal of Environmental Engineering*, 2018, no. 144 (3), pp. 04018011-1-9.
15. Fedorov S. V., Vasil'ev V. M., Klement'ev M. N. *Issledovanie gazovydeleniya na uchastke kanalizatsionnoy seti* [Investigation of gas release on the site of the sewer network]. *Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika – Water supply and sanitary equipment*, 2019, no. 5, pp. 54–60.