

Известия вузов. Строительство. 2022. № 1. С. 57–69.

ISSN 0536-1052

News of Higher Educational Institutions. Construction. 2022; (1): 57–69.

ISSN 0536-1052

Научная статья

УДК 628.232

DOI: 10.32683/0536-1052-2022-757-1-57-69

## **ОЦЕНКА РАБОТЫ ТРУБЧАТОГО СТОЯКА ДЛЯ ПОДАЧИ ВОЗДУХА В ДЮКЕР С «ВОЗДУШНОЙ ПОДУШКОЙ»**

**Святослав Викторович Федоров, Виктор Михайлович Васильев**

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

**Аннотация.** Рассмотрено моделирование трубчатого стояка  $d_y = 0,1–1$  м с высотой перепада  $H = 5, 10, 30$  и  $70$  м в ANSYS CFX. Для оценки влияния «воздушной подушки» на работу стояка проведены расчеты по двум вариантам модели: без подпора в нижнем бьефе и с подпором. В результате расчетов получены графики распределения давления внутри стояка, графики зависимости давления от высоты перепада и степени заполнения трубы, графики зависимости заполнения стояка от расхода воды и график зависимости коэффициента эжекции от заполнения стояка водой. Выполнено сравнение модельных значений коэффициента эжекции с экспериментальными данными других авторов. Определена величина подпора, при которой эжекция воздуха становится минимальной.

**Ключевые слова:** перепадная шахта, трубчатый стояк, коэффициент эжекции, дюкер с «воздушной подушкой», компьютерное моделирование, ANSYS CFX

**Для цитирования:** Федоров С.В., Васильев В.М. Оценка работы трубчатого стояка для подачи воздуха в дюкер с «воздушной подушкой» // Известия вузов. Строительство. 2022. № 1. С. 57–69. DOI: 10.32683/0536-1052-2022-757-1-57-69.

Original article

## **EVALUATION OF THE TUBULAR RISER OPERATION IN TERMS OF SUPPLYING AIR TO A DUCKER WITH AN «AIR CUSHION»**

**Svyatoslav V. Fedorov, Viktor M. Vasilyev**

Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering,  
Saint Petersburg, Russia

**Abstract.** The paper considers the modeling of a sewer tubular riser  $DN = 100–1000$  mm with a drop height  $H = 5, 10, 30$  and  $70$  m in ANSYS CFX. To assess the effect of the «air cushion» on the work of the riser, calculations were carried out for two variants of the model: without a back water in the downstream and with back water. As a result of calculations, graphs of the pressure distribution inside the riser, graphs of the pressure dependence on the height of the drop and the degree of filling of the pipe, graphs of the dependence of the riser filling on water flow and a graph of the dependence of the ejection coefficient on the water filling of the riser were obtained. The model values of the ejection

coefficient are compared with the experimental data of other authors. The back water value at which the process of air ejection significantly decreases is determined.

**Keywords:** drop shaft, sewer tubular riser, ejection coefficient, ducker with air cushion, computer simulation, ANSYS CFX

**For citation:** Fedorov S.V., Vasilyev V.M. Evaluation of the tubular riser operation in terms of supplying air to a ducker with an «air cushion». *News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2022; (1): 57–69. (In Russ.). DOI: 10.32683/0536-1052-2022-757-1-57-69.

**Введение.** Перепадные шахты с трубчатыми стояками используются в системах канализации для сброса сточных вод из районных сетей, расположенных на небольшой глубине, в магистральные канализационные коллекторы глубокого заложения, которые транспортируют стоки на очистные сооружения. В Санкт-Петербурге перепадные шахты достаточно широко используются в системах тоннельной канализации. На главном канализационном коллекторе северной части Санкт-Петербурга используются сооружения с высотой падения сточных вод до 65 м [1].

В трубчатых стояках имеет место безнапорное движение сточной жидкости. При движении по вертикальному трубопроводу за счет собственного веса поток сточных вод движется по спиралеобразной траектории. В живом сечении трубопровода формируется двухфазный поток, режим движения которого зависит от расхода сточных вод. При достижении максимального расхода, который пропускает стояк, исключая подтопление вентиляционного патрубка, будет наблюдаться работа полным сечением. При меньших расходах сточных вод формируется дисперсно-кольцевой режим, когда сточная жидкость движется в виде пленки по стенке трубопровода, а в ядре потока находится газовоздушная смесь, увлекаемая потоком воды через вентиляционный патрубок стояка. По мере падения пленочный поток может распасться на отдельные струи и мелкие капли, которые насыщают собой газозвоздушную смесь в виде тумана [2].

В результате увлечения газозвоздушной среды падающим потоком осуществляется ее нагнетание в нижерасположенную канализационную сеть. Поэтому в водобойном колодце и подсводном пространстве отводящего канализационного коллектора будет возникать избыточное давление газозвоздушной среды [3]. Как правило, сечение коллектора подобрано на пропуск расчетного расхода сточных вод без учета движения газозвоздушного потока, что в дальнейшем приводит к выбросу канализационных газов в окружающую среду через близлежащие сооружения на сети [4–6].

Исключение проблемы выбросов канализационных газов, повышение энергоэффективности и экологичности магистральной канализации может быть достигнуто с помощью применения технологии дюкера с «воздушной подушкой» [7]. Формирование «воздушной подушки» обеспечивается с помощью эжектирующей способности перепадов без затрат электроэнергии. Для проектирования данной системы необходимо руководствоваться эжектирующей способностью стояков, меняющейся в течение суток в зависимости от расхода сточных вод.

Большой вклад в исследование трубчатых стояков сделан на кафедре канализации ЛИСИ в 1970–1980-е гг. Ю.Д. Шутовым, М.И. Алексеевым, В.М. Васильевым, М.Г. Гайфутдиновым. В работе [8] представлены расчет-

ные зависимости для определения расхода увлекаемого воздуха. Зависимости получены на основе упрощенной системы уравнений Навье–Стокса для плоского течения вдоль оси стояка. Решение допустимо при равенстве градиента давления в трубопроводе нулю. В [9] на основании аналитических зависимостей [8] рассмотрены графики объемного коэффициента эжекции воздуха с учетом высоты перепада и диаметра стояка. Результаты показывают, что эжектирующая способность стабилизируется при достижении предельной высоты стояка. Например, для наибольшего диаметра стояка  $d_y = 1$  м эта высота составила 33 м.

В [10] проведено исследование увлекающей способности потока на лабораторной модели трубчатого перепада высотой 7,7 м и  $d_y = 0,38$  м. Для оценки градиента давления по высоте трубопровода предложена аналитическая зависимость, полученная из уравнения импульса для воздушной фазы. Максимальный вакуум был зафиксирован в верхней части трубопровода, и он постепенно уменьшался по мере приближения потока к нижней части до величины атмосферного давления. Максимальный градиент давления наблюдался в нижней части стояка, где поток максимально дробился на капли. В качестве фактора, определяющего поступление воздуха в трубчатый стояк, отмечается вакуумметрическое давление в верхней части. Также было установлено влияние подпора в отводящем трубопроводе на давление в стояке.

В [11] отмечается важное значение взаимного влияния между потоками воды и воздуха в сооружениях с перепадом отметки подводящего и отводящего коллектора. Для процесса падения жидкости авторы выделяют следующие факторы захвата воздушной среды: воздействие струйного потока, погружение струи под уровень в водобойном колодце, капельный унос при дроблении струи и улавливание воздуха водяной завесой. Частично воздух преодолевает сооружение за счет трения о поверхность воды, а частично в виде пузырьков, насыщая водную фазу.

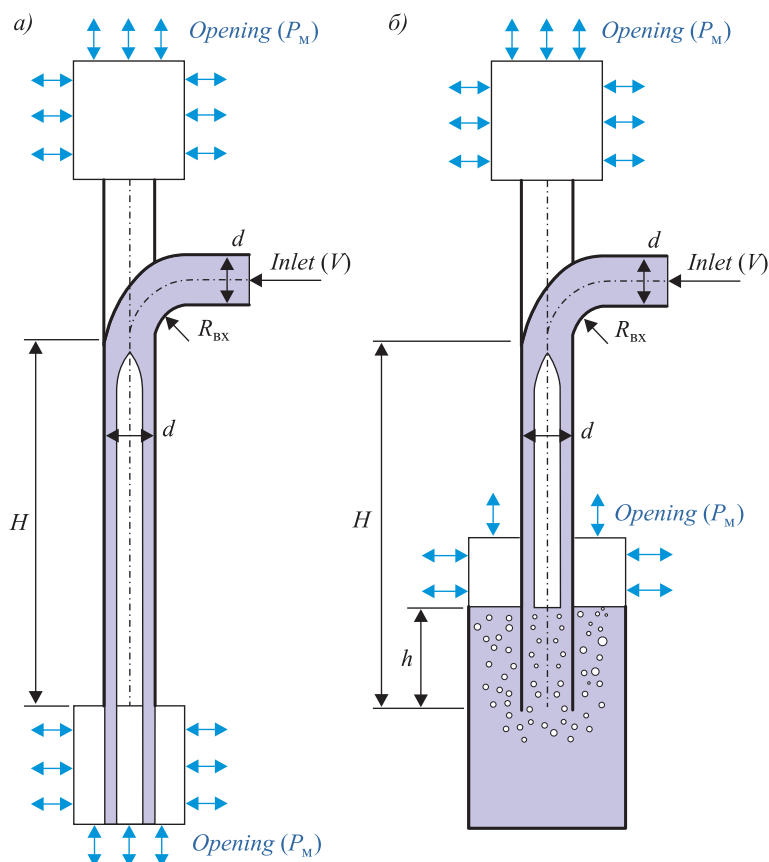
В [12] была предпринята попытка измерить величину расхода увлекаемого воздуха в экспериментальной шахте. Для этого верхняя часть шахты была снабжена крышкой с патрубком. В момент пропуска воды через шахту на конце патрубка измерялось давление воздушной среды, которое позволило вычислить расход увлекаемого воздуха. Результаты эксперимента показали закономерность снижения расхода воздуха и его дальнейшую стабилизацию по мере увеличения расхода воды.

Также интерес вызывают работы [13, 14], в которых рассматривается движение потока в вертикальных трубопроводах с тангенциальным подводом воды. За счет тангенциального подвода поток предпочтительно двигается, касаясь стенки трубы, образуя кольцевое сечение. В ходе исследования было измерено давление на стенке и оценена скорость захвата воздуха. Давление на стенку оставалось положительным вдоль всего трубопровода. В [13] представлены данные по концентрации аэрации потока, которая колебалась примерно от 5 до 25 % и уменьшалась с увеличением расхода.

Учитывая рассмотренный опыт, можно заключить, что значительное влияние на работу стояка оказывает давление, зависящее от расхода воды. По этой причине результаты, полученные в [9], могут быть дополнены. Зарубеж-

ные исследования не учитывают конструктивных особенностей трубчатых перепадов, которые применяются в отечественной практике проектирования, и не охватывают весь объем возможных габаритных размеров. Кроме этого отсутствует информация о влиянии подпора от «воздушной подушки» на отводящем коллекторе на расход газозвушной среды в стояке.

**Методы.** Для изучения поставленных вопросов применялось моделирование в программе ANSYS CFX. Выполнялась серия расчетов для двух вариантов расчетной области трубчатого стояка. Первый вариант модели (рис. 1, а) предполагал свободный пропуск воды через вертикальный трубопровод без устройства водобойного колодца, во втором варианте (рис. 1, б) устраивался водобойный колодец со слоем воды над концом трубопровода, эквивалентным давлению в «воздушной подушке». Радиус закругления входной воронки  $R_{вх}$  равнялся диаметру стояка  $d$ . Диаметр стояка и подводящего трубопровода также были приняты равными. В обоих случаях для подвода потока воды применялось граничное условие *Inlet* на торце подводящего трубопровода, где задавалась скорость входящего потока воды  $V$ , м/с. Для



*Рис. 1.* Схема расчетной области модели трубчатого стояка в ANSYS CFX

*a* – без подпора; *б* – с подпором от «воздушной подушки»

*Fig. 1.* Diagram of the design area of the model of a tubular riser in ANSYS CFX

*a* – without support; *b* – with support from «the air cushion»

обеспечения поступления воздушной среды в стояк в верхней части трубопровода над вентиляционным патрубком был предусмотрен объем окружающей среды, более широкий чем сечение стояка, на боковых границах которого устанавливалось граничное условие *Opening*, где задавалась величина избыточного давления  $P_m = 0$  Па. Для удаления двухфазного потока из расчетной области также предусматривалось граничное условие *Opening* с давлением  $P_m = 0$  Па, только в первом варианте оно указывалось на границах объема окружающей среды, аналогичного в верхней части, а во втором варианте условие было задано на границах водобойного колодца, располагающихся выше уровня воды, имитирующей подпор. Площадь живого сечения кольцевого канала в водобойном колодце (между стояком и стенками колодца) превышала площадь живого сечения стояка в 4 раза, с целью снижения влияния сопротивления стенок на работу перепада.

При назначении типоразмеров трубы стояка руководствовались опытом из работы [9]. Для расчета были приняты диаметры в диапазоне от 0,1 до 1 м с шагом 0,1 м. По высоте стояка были приняты следующие варианты  $H = 5, 10, 30$  и  $70$  м. Высота слоя жидкости  $h$  для модели с «воздушной подушкой» назначалась  $1/5, 2/5$  и  $3/5$  от высоты  $H$ .

Для задания размеров сетки выполнялись предварительные расчеты. Используя известную методику, произведен гидравлический расчет для каждого типоразмера трубы. Для ряда расходов воды определялась средняя по высоте трубы скорость, критерий Рейнольдса, толщина слоя воды в стояке. На основании этих данных определялись толщина пограничного слоя и размер ближайшего к стенкам элемента сетки. Преимущественно в расчетной области использовалась тетраэдрическая сетка, которая на границе с твердой стенкой улучшалась с помощью команды *Inflation*. Оптимальный размер ячеек сетки назначался на основании предварительных расчетов и анализа результатов. В модели для расчетной области задавалось наличие гравитации по оси стояка, применялась двухфазная модель со свободной поверхностью на границе раздела водной и воздушной фаз. В качестве модели турбулентности использовалась модель SST. В ходе расчета решалась нестационарная задача. Общее время расчета составляло 70 с.

Кроме моделирования для оценки эпюры давления в стояке и влияния на нее подпора от «воздушной подушки» может быть использовано уравнение, описывающее установившееся плоское течение потока вдоль оси стояка  $z$ :

$$\bar{Z} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} = W \frac{\partial W}{\partial z}, \quad (1)$$

где  $\bar{Z}$  – ускорение свободного падения,  $9,81$  м/с<sup>2</sup>;

$\rho$  – средняя плотность пристеночного слоя потока, кг/м<sup>3</sup>;

$\partial P / \partial z$  – градиент давления по высоте стояка, Па/м;

$W$  – скорость движения потока по оси стояка.

Решая уравнение относительно  $P$  при граничном условии:

$$z = H, P = P_{\text{п}}, \quad (2)$$

где  $P_{\text{п}}$  – избыточное давление от «воздушной подушки», а также допуская линейное изменение скорости потока по высоте трубы, получим выражение, описывающее изменение давления:

$$P = \rho \bar{Z}z - \rho \left( \frac{(W_2 - W_1)z^2}{2H} + W_1z \right) \left( \frac{(W_2 - W_1)}{2H} \right) + P_{\text{п}} - \rho \bar{Z}H + \rho \left( \frac{(W_2 - W_1)H}{2} + W_1H \right) \left( \frac{(W_2 - W_1)}{2H} \right), \quad (3)$$

где  $W_{1,2}$  – скорость движения потока на входе и выходе из трубопровода, которая может быть принята на основании экспериментальных данных.

В результате расчетов были получены графики распределения давления по высоте стояка, максимальное вакуумметрическое давление, скорости воздушной и водной среды на входе и выходе из трубы, массовые расходы воздуха и воды. Установившееся движение наступало на 30–40-й секунде расчета. Значения характеристик за оставшееся время расчета осреднялось. В качестве примера на рис. 2, а представлены результаты по полю объемной доли воды и воздуха для двух вариантов модели стояка  $d_y = 1$  м и  $H = 5$  м. Расход воды был равен  $Q_w = 9,94$  м<sup>3</sup>/с. В вертикальном трубопроводе сформировался закручивающийся поток, в центральной части которого находится увлекае-

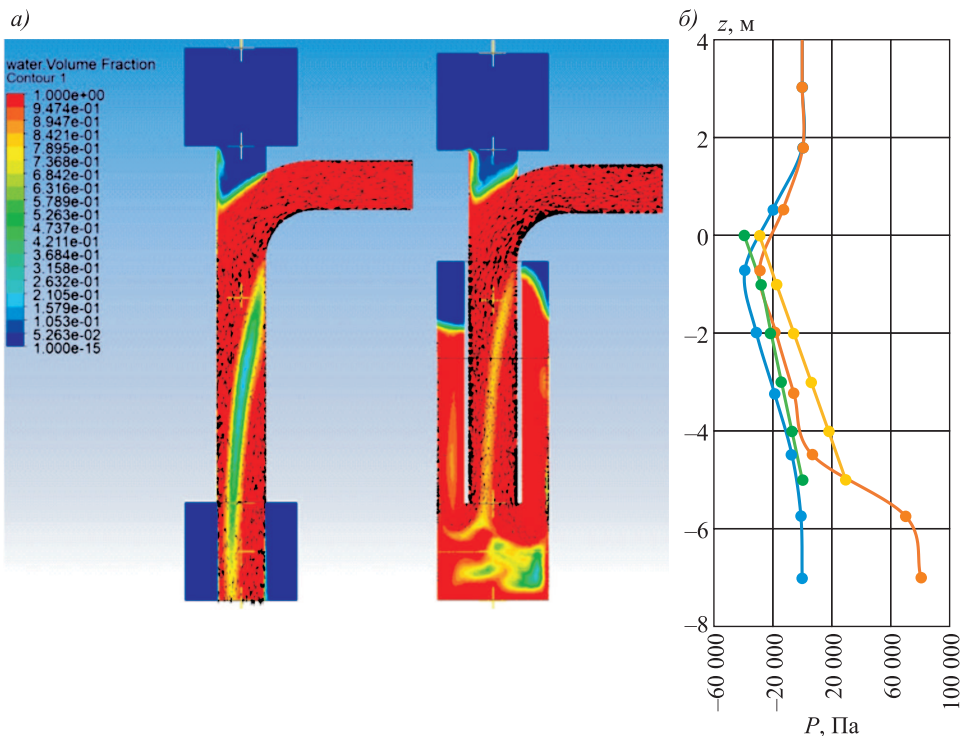


Рис. 2. Результаты моделирования для трубчатого стояка  $d_y = 1$  м,  $H = 5$  м  
 а – поле объемной доли (красный цвет – вода, синий – воздух) для двух вариантов модели (слева – без подпора, справа – с подпором от «воздушной подушки»); б – графики распределения давления по высоте стояка (синий/зеленый – без подпора, красный/желтый – с подпором от «воздушной подушки»); ANSYS CFX/расчет по уравнению (3)

Fig. 2. Simulation results for a tubular riser  $d_y = 1$  m,  $H = 5$  m  
 а – volume fraction field (red – water, blue – air) for two variants of the model (left – without support, right – with support from «the air cushion»); б – graphs of pressure distribution along the height of the riser (blue/green – without support, red/yellow – with «air cushion» support); ANSYS CFX/calculation according to equation (3)

мая воздушная среда. Для варианта модели с подпором ядро потока менее насыщено воздушной средой за счет присутствия слоя воды ( $3/5H$ ) в стояке. Справа (рис. 2, б) представлены графики распределения давления, полученные с помощью моделирования и путем расчета по уравнению (3). Максимальный вакуум находится в верхней части стояка, чуть ниже входной воронки. При отсутствии подпора давление составляет  $P_{\text{вак}} = -38,8$  кПа. При наличии подпора вакуум уменьшается до  $P_{\text{вак}} = -29$  кПа. При этом нижняя часть стояка начинает работать с избыточным давлением.

На вакуумметрическое давление в стояке оказывает влияние высота падения. В качестве примера на рис. 3 представлены графики давления в стояке  $d_y = 1$  м с различными высотами при условии постоянного расхода воды  $Q_w = 9,94$  м<sup>3</sup>/с. По мере роста высоты наблюдается рост вакуума в стояке. Положение точки максимального вакуума также изменяется. По мере увеличения перепада она опускается ниже.

Также давление зависит от степени заполнения сечения стояка водой, которая выражается отношением площади сечения, занимаемой водой, к площади трубы –  $\omega_w/\omega$ . На рис. 4 представлены графики вакуумметрического давления в зависимости от  $\omega_w/\omega$  и высоты перепада  $H$ . Пунктирными линиями показаны аппроксимирующие функции. На графиках наблюдается рост вакуума по мере увеличения заполнения трубопровода.

Анализируя уравнение (3) и результаты моделирования, можно сделать вывод, что наибольший вклад в значение вакуума оказывает плотность пристеночного слоя двухфазного потока  $\rho$ . Совместное движение воды с воздухом вызывает аэрацию воды, уменьшая вес пристеночного слоя и силу трения о стенку трубопровода. На рис. 5 показан график изменения  $\rho$  в зависимости от заполнения трубы, построенный по результатам расчета первого варианта модели. По уравнению (3) вычисляем плотность, используя модельные значения максимального вакуумметрического давления и скоростей движения воды в стояке. На графике отражается снижение  $\rho$  по

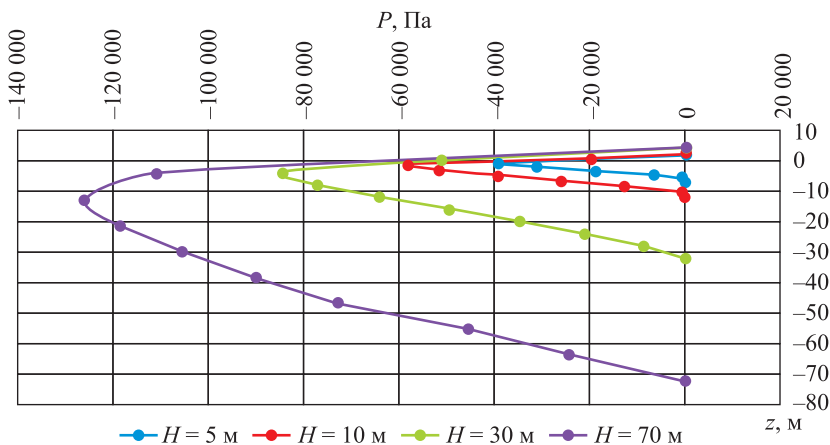
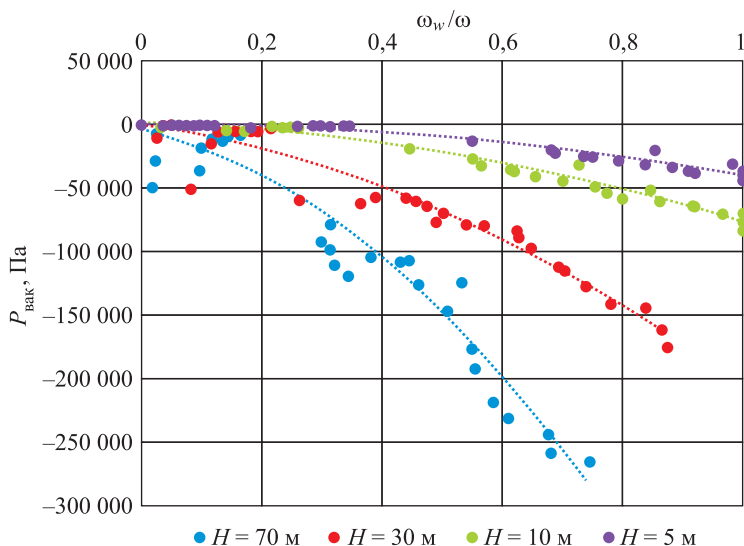


Рис. 3. Графики давления для стояка  $d_y = 1$  м и  $Q_w = 9,94$  м<sup>3</sup>/с в зависимости от высоты

Fig. 3. Pressure charts for the riser  $d_y = 1$  m and  $Q_w = 9,94$  м<sup>3</sup>/с depending on the height

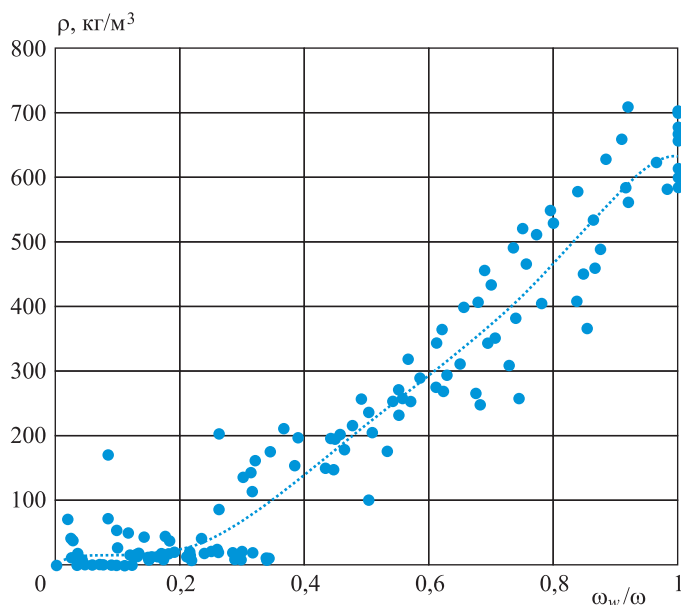


*Рис. 4. Зависимость вакуумметрического давления от заполнения  $\omega_w/\omega$  и высоты перепада  $H$*

*Fig. 4. Dependence of the vacuum pressure on the filling  $\omega_w/\omega$  and in the height of the drop  $H$*

мере уменьшения заполнения трубы водой. В случае малых расходов воды в стояк поступает большее количество воздуха и процесс аэрации протекает интенсивнее.

Для оценки пропускной способности стояка были построены графики зависимости  $\omega_w/\omega$  от расхода воды  $Q_w$  и диаметра трубопровода.



*Рис. 5. Зависимость средней плотности пристеночного слоя  $\rho$  от  $\omega_w/\omega$*

*Fig. 5. Dependence of the average density of the wall layer  $\rho$  on  $\omega_w/\omega$*



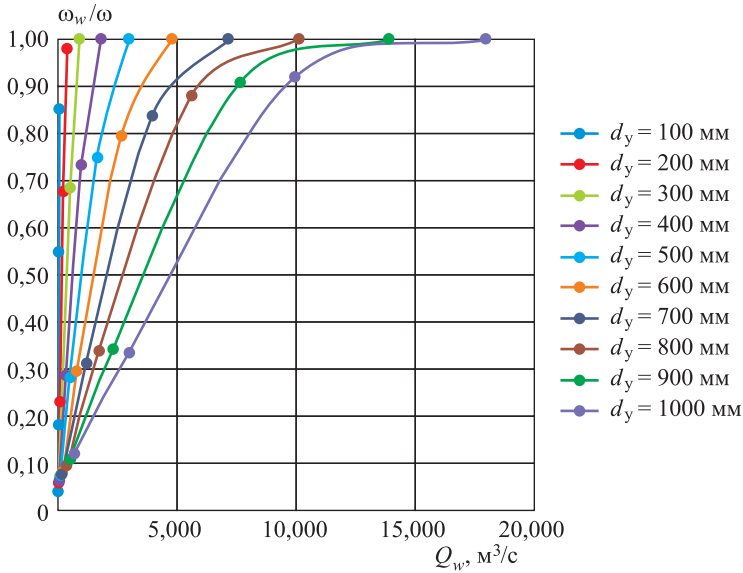


Рис. 6. Графики зависимости заполнения  $\omega_w/\omega$  от расхода воды  $Q_w$  для стояка высотой  $H = 5$  м

Fig. 6. Graph of the dependence of the filling  $\omega_w/\omega$  on the water flow  $Q_w$  for the riser height  $H = 5$  m

В качестве примера на рис. 6 показаны графики для трубчатого перепада  $H = 5$  м.

На рис. 7 показан график зависимости коэффициента эжекции  $n_{эж}$  от заполнения  $\omega_w/\omega$ . Коэффициент эжекции представляет собой отношение расхода увлекаемого воздуха к расходу воды. На графике представлены результаты для двух вариантов модели с учетом разной высоты подпора. Отметим,

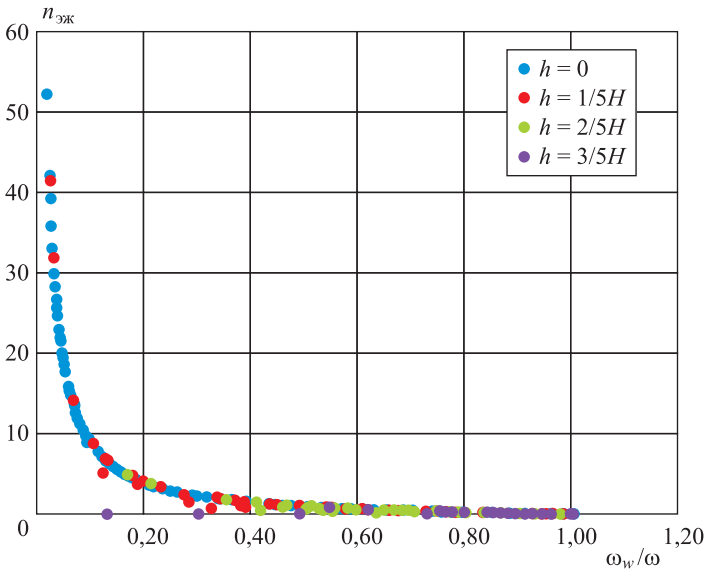
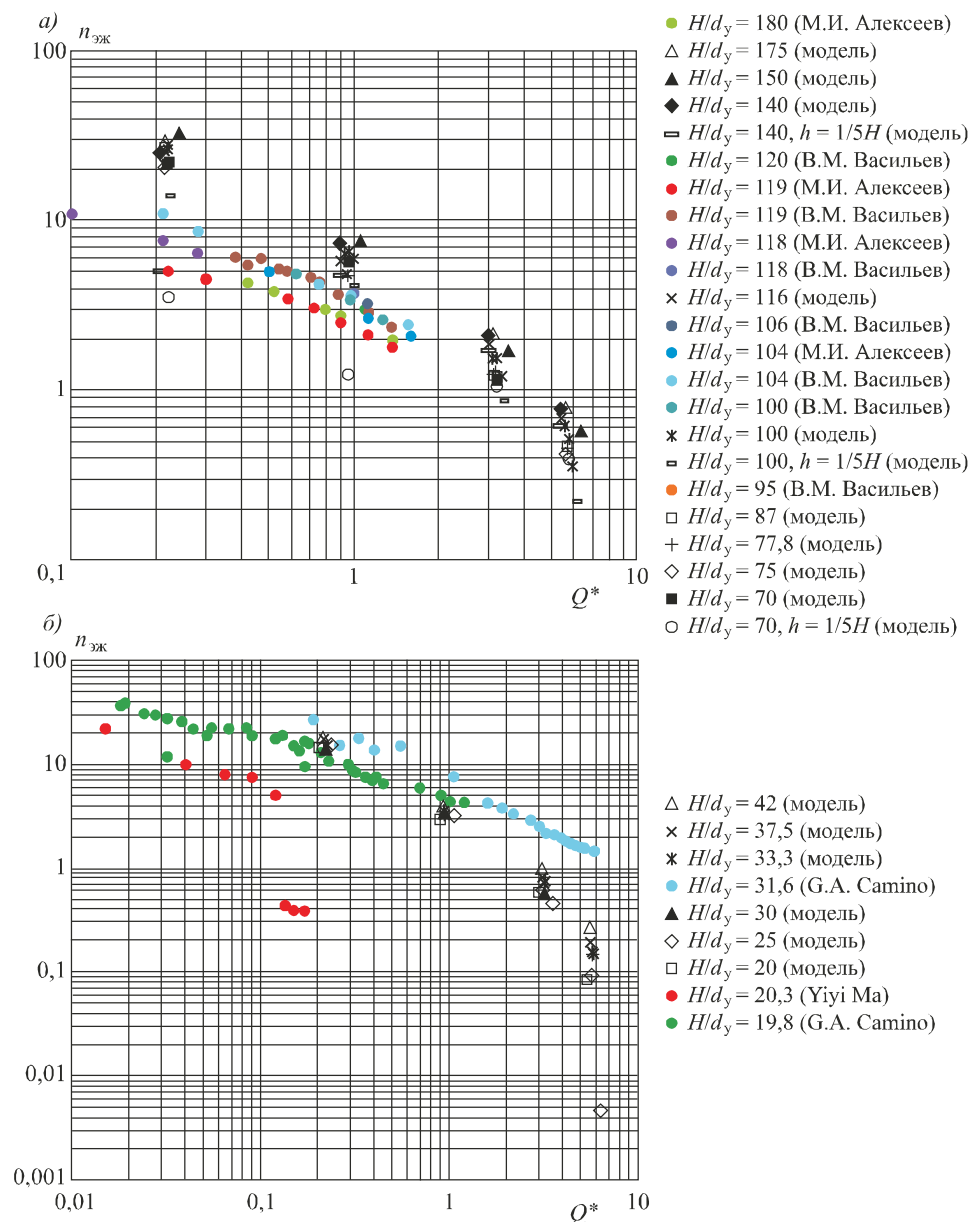


Рис. 7. График зависимости  $n_{эж}$  от  $\omega_w/\omega$

Fig 7. Graph of the dependence of  $n_{ej}$  on  $\omega_w/\omega$



что при величине подпора  $h = 3/5H$  эжектирующая способность стояка прекращается.

Проведение модельных расчетов позволило получить распределение давления для различных характеристик трубчатого стояка с учетом возможного подпора от «воздушной подушки». Полученные закономерности качественно согласуются с результатами эксперимента в [7]. Для оценки градиента давления может быть использовано уравнение (3) с применением экспериментальных значений средней по высоте плотности пристеночного слоя потока и скоростей движения на входе и выходе из стояка.

Для оценки результатов эжектирующей способности стояков использовались экспериментальные данные других авторов [2, 12, 15], представленные в виде зависимостей коэффициента эжекции  $n_{эж}$  от безразмерного

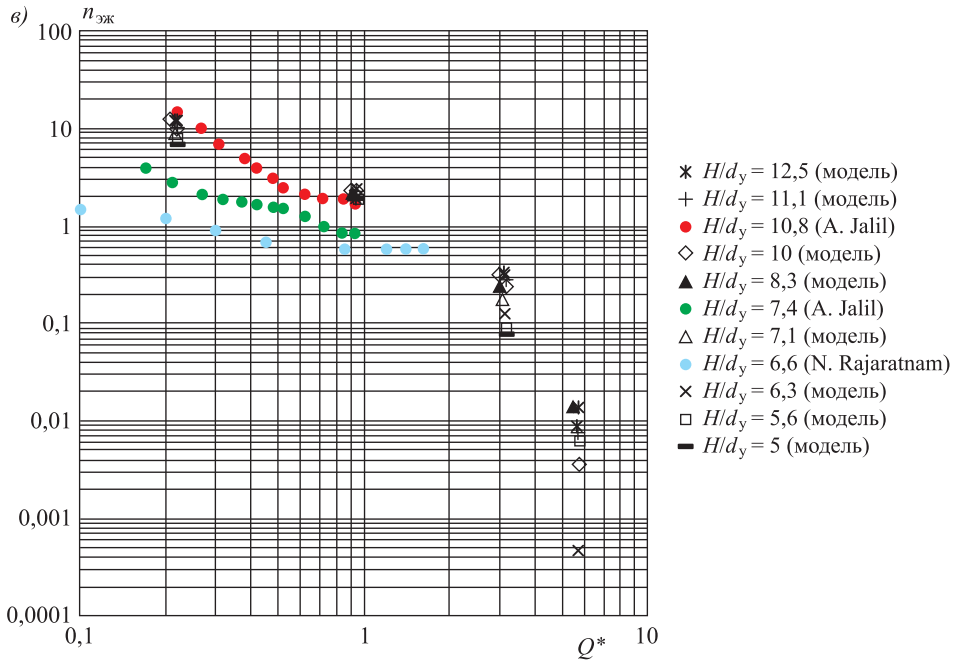


Рис. 8. Графики зависимости  $n_{эж}$  от  $Q^*$  и соотношения  $H/d_y$   
 $H/d_y = 70-180$  (а);  $19,8-42$  (б);  $5-12,5$  (в)

Fig. 8. Graph of the dependence of  $n_{ej}$  on  $Q^*$  and the ratio of  $H/d_y$   
 $H/d_y = 70-180$  (a);  $19,8-42$  (b);  $5-12,5$  (c)

расхода воды  $Q^*$  и соотношения  $H/d_y$ , определяющего габариты перепада (рис. 8).

Результаты моделирования для диапазона  $H/d_y = 70-180$  оказались завышенными по сравнению с экспериментальными данными (рис. 8, а). Более высокая эжектирующая способность может объясняться отсутствием водобойного колодца в первом варианте модели. На график также вынесены результаты моделирования модели по второму варианту, когда подпор составлял  $h = 1/5H$ . В данном случае результаты располагаются ближе к области экспериментальных данных.

На рис. 8, б, в показаны экспериментальные и модельные результаты для диапазонов  $H/d_y = 19,8-42$  и  $H/d_y = 5-12,5$ . Для диапазона расходов  $Q^*$  значения коэффициента эжекции попали в область экспериментальных данных.

**Выводы.** Полученные результаты позволяют установить величину эжектирующей способности перепадного стояка для диаметров  $d_y = 100-1000$  мм при различных режимах работы. Определена величина подпора от «воздушной подушки» в нижнем бьефе  $h = 3/5H$ , при которой наблюдается минимальная эжекция воздушной среды. Давление в стояке зависит от давления в нижнем бьефе. В случае самотечной канализационной сети давление в стояке преимущественно вакуумметрическое, с максимальным вакуумом в верхней части, который уменьшается до атмосферного давления в водобойном колодце. При наличии «воздушной подушки» избыточное давление в нижнем бьефе оказывает влияние на распределение давления в стояке. Нижняя часть стояка может

работать под избыточным давлением, а верхняя под вакуумметрическим, либо вакуумметрическое давление может быть вообще исключено и в верхней части стояка будет присутствовать атмосферное давление.

#### Список источников

1. *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. P. 42–51.
2. *G. Adriana Camino, Zhu D.Z., Rajaratnam N.* Flow observations in tall plunging flow dropshafts // Journal of Hydraulic Engineering. 2015. Vol. 141. Issue 1.
3. *Zobeyer H., Zhu D.Z., Edwini-Bonsu S.* Air flow model development and application in a complex combined sewer system // Water Science and Technology. 2020. No. 82.
4. *Gang Pan, Bao Wang, Shuai Guo, Wenming Zhang, Edwini-Bonsu S.* Statistical analysis of sewer odour based on ten-year complaint data // Water Science and Technology. 2020. Vol. 217.
5. *Wenming Zhang, Zhu D.Z., Rajaratnam N., Edwini-Bonsu S., Jan Fiala, Wayne Pelz.* Use of air circulation pipes in deep dropshafts for reducing air induction into sanitary sewers // Journal of Hydraulic Engineering. 2015. Vol. 142, no. 4. 04015092.
6. *Qi Zhang, Weiyun Shao, Zhu D.Z., Weilin Xu.* Steady air flow model for large sewer networks: a theoretical framework // Water Science & Technology. 2020. Vol. 82, no. 3.
7. *Федоров С.В., Васильев В.М.* Моделирование дюкера с воздушной подушкой // Вестн. граждан. инженеров. 2021. № 2. С. 158–165.
8. *Алексеев М.И.* Теоретические исследования по определению количества воздуха, поступающего в вертикальные водоводы при безнапорном движении жидкости // Исследования в области водоснабжения: Межвуз. тематич. сб. тр. Л.: ЛИСИ, 1980. С. 133–139.
9. *Гайфутдинов М.Г.* Взаимное движение сточных вод и газов в канализационных коллекторах и мероприятия по предотвращению газовой коррозии: Дис. ... канд. техн. наук. Л., 1985. 213 с.
10. *Yiyi Ma, Rajaratnam N., Zhu D.Z.* Air entrainment in a tall plunging flow dropshaft // Journal of Hydraulic Engineering. 2016. Vol. 142, no. 10. P. 04016038.
11. *Granata F., Marinis G.D., Hager W.* Hydraulics of circular drop manholes // Journal of Irrigation and Drainage Engineering. 2011. Vol. 137. P. 102–111.
12. *Rajaratnam N., Mainali A., Hsung C.Y.* Observations on flow in vertical dropshafts in urban drainage systems // Journal of Environmental Engineering. 1997. Vol. 123. P. 486–491.
13. *Can Zhao, Zhu D., Zhi-Ping Liu.* Experimental study of flow in a vortex drop shaft // Journal of Hydraulic Engineering. 2006. Vol. 132. Issue 1.
14. *Zhang W., Junxing Wang, Zhao Zhou.* Numerical Simulation of Hydraulic Characteristics in A Vortex Drop Shaft // Water. 2018. Vol. 10. P. 1393.
15. *Jalil A.* Experimental and numerical study of plunging flow in vertical dropshafts. Ph.D. thesis, Civil and Environmental Engineering, Univ. of Alberta, Edmonton, Canada, 2009.

#### References

1. *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): 42–51.
2. *G. Adriana Camino, Zhu D.Z., Rajaratnam N.* Flow observations in tall plunging flow dropshafts. *Journal of Hydraulic Engineering*. 2015; 141(1).

3. Zobeayer H., Zhu D.Z., Edwini-Bonsu S. Air flow model development and application in a complex combined sewer system. *Water Science and Technology*. 2020; (82).
4. Gang Pan, Bao Wang, Shuai Guo, Wenming Zhang, Edwini-Bonsu S. Statistical analysis of sewer odour based on ten-year complaint data. *Water Science and Technology*. 2020; 217.
5. Wenming Zhang, Zhu D.Z., Rajaratnam N., Edwini-Bonsu S., Jan Fiala, Wayne Pelz. Use of air circulation pipes in deep dropshafts for reducing air induction into sanitary sewers. *Journal of Hydraulic Engineering*. 2015; 142(4): 04015092.
6. Qi Zhang, Weiyun Shao, Zhu D.Z., Weilin Xu. Steady air flow model for large sewer networks: a theoretical framework. *Water Science & Technology*. 2020; 82(3).
7. Fedorov S.V., Vasilev V.M. Simulation of an inverted siphon with an air cushion. *Bulletin of Civil Engineers*. 2021; (2): 158–165. (In Russ.).
8. Alekseev M.I. Theoretical studies on the determination of the amount of air entering vertical water ducts during non-pressurized fluid movement. Research in the field of water supply: Interuniversity thematic collection of works. Leningrad: LISI, 1980. P. 133–139. (In Russ.).
9. Gayfutdinov M.G. Mutual movement of wastewater and gases in the collectors and measures to prevent gas corrosion: Diss. ... PhD. Leningrad, 1985. 213 p. (In Russ.).
10. Yiyi Ma, Rajaratnam N., Zhu D.Z. Air entrainment in a tall plunging flow dropshaft. *Journal of Hydraulic Engineering*. 2016; 142(10): 04016038.
11. Granata F., Marini G.D., Hager W. Hydraulics of circular drop manholes. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 2011; 137: 102–111.
12. Rajaratnam N., Mainali A., Hsung C.Y. Observations on flow in vertical dropshafts in urban drainage systems. *Journal of Environmental Engineering*. 1997; 123: 486–491.
13. Can Zhao, Zhu D., Zhi-Ping Liu. Experimental study of flow in a vortex drop shaft. *Journal of Hydraulic Engineering*. 2006; 132(1).
14. Zhang W., Junxing Wang, Zhao Zhou. Numerical Simulation of Hydraulic characteristics in a vortex drop shaft. *Water*. 2018; 10: 1393.
15. Jalil A. Experimental and numerical study of plunging flow in vertical dropshafts. Ph.D. thesis, Civil and Environmental Engineering, Univ. of Alberta, Edmonton, Canada, 2009.

#### **Информация об авторах**

**С.В. Федоров** – кандидат технических наук, доцент

**В.М. Васильев** – доктор технических наук, профессор

#### **Information about the authors**

**S.V. Fedorov** – PhD, Ass. Professor

**V.M. Vasilyev** – DSc, Professor

**Вклад авторов:** все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Contribution of the authors:** the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 10.12.2021  
Одобрена после рецензирования 12.01.2022  
Принята к публикации 18.01.2022

The article was submitted 10.12.2021  
Approved after reviewing 12.01.2022  
Accepted for publication 18.01.2022