

УДК 532.5/7.001.12(076.1.5)

ОЦЕНКА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ РАССЕИВАЮЩЕГО ВЫПУСКА ПРИ УСЛОВИИ ОТКЛЮЧЕНИЯ ОТДЕЛЬНЫХ ОГОЛОВКОВ

Лапшев Н. Н., Федоров С. В.

ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет», Санкт-Петербург, Россия (190005, Санкт-Петербург, ул. 2-я Красноармейская, 4), e-mail: svyatoslavfedorov@mail.ru

В работе рассмотрены различные варианты зависимостей поступления загрязняющих веществ в реку при сбросе сточных вод. На основании нестационарности концентрации и возможности сброса стоков с высокой концентрацией предлагается рассмотреть варианты оптимизации работы рассеивающего выпуска в реке. При основном режиме предполагается использование всех оголовков для сброса сточных вод, а для случаев, требующих улучшения условий смешения в работе, предлагается исключать из работы отдельные оголовки, что позволит интенсифицировать процесс начального разбавления. Для оценки санитарного состояния реки для различных режимов функционирования рассеивающего выпуска произведен расчет начального разбавления по методике Н. Н. Лапшева и основного разбавления с помощью нормативной методики [8], а также с помощью аналитического решения уравнения турбулентной диффузии для случая объемного распространения примеси в реке, разработанного авторами. Проведен сравнительный анализ полученных результатов.

Ключевые слова: сброс сточных вод в реки и водоемы, рассеивающий выпуск, уравнение турбулентной диффузии, конструкция распределительной трубы рассеивающего выпуска.

ESTIMATION OF OPERATION OF THE DISPERSION DISCHARGE IN TERMS OF SOME OF THE OUTLET PORTALS ARE DISCONNECTED

Lapshev N. N., Fedorov S. V.

Federal State Budget Educational Institution of Higher Professional Education "Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering", Saint-Petersburg, Russia (190005, Saint-Petersburg, 2nd Krasnoarmeyskaya street, 4), e-mail: office@erkon.ru

Different variants of pollutants income into the river caused by the wastewater discharge are considered in this study. Because of non-stationarity of the concentrations and possibility of discharging wastewater of high concentration it is invited to consider different variants of optimization of the dispersion discharge operation in a river. Routine mode is implied to use all of outlet portals for wastewater discharge. For cases that need better diffusion conditions it is proposed to exclude some of the outlet portals from discharge operation that can intensify the process of the initial dilution. For the estimation of sanitary condition of the river the calculation of the initial dilution is produced by the method of N. N. Lapshev and the calculation of main dilution is produced using the regulatory method. The analytical solution of the equation of turbulent diffusion for the case of three-dimensional distribution of impurities in the river developed by authors of the study is also used for the estimation of sanitary condition of the river. The comparative analysis of the results of the calculation is carried out. For the technical implementation of management structure of the dispersion discharge the constructions of distribution pipe for the river conditions and for the pond conditions are proposed.

Key words: Wastewater discharge in rivers and in ponds, dispersion discharge (outlet), equation of turbulent diffusion, construction of distribution pipe of the dispersion discharge.

Введение

Сегодня вопросы экологической безопасности имеют огромное значение в среде обитания крупных городов и промышленных центров. Особенно остро экологическая проблема касается водных объектов, являющихся ценным ресурсом, используемым почти во всех отраслях народного хозяйства. Значительное влияние на санитарное состояние оказывают сточные воды, которые, как правило, поступают после предварительной очистки в водоем, где в дальнейшем протекают процессы разбавления и самоочищения. Также в

практике эксплуатации сооружений транспортировки и очистки сточных вод встречаются аварийные ситуации, при которых может наблюдаться сброс неочищенных вод. Поэтому на этапе разработки технологии водопользования обязательным условием является рассмотрение всех возможных вариантов влияния на качество воды и мер по их снижению или предотвращению.

Главной целью статьи является изучение системы взаимодействия «рассеивающий выпуск – водный объект», а именно рассмотрение влияния эксплуатационных характеристик выпуска на качество воды в водоеме.

Важную роль в работе городских очистных сооружений играет выпуск сточных вод. Эффективная работа выпуска позволяет интенсифицировать процессы разбавления очищенных сточных вод и обеспечить выполнение требований к качеству в ближайшем створе водопользования. На практике концентрация поступающих в водный объект загрязнений может изменяться с течением времени. Процесс изменения может объясняться варьирующимся составом самих сточных вод, притекающих на станцию, а также влиянием факторов, связанных с нарушением технологии очистки. Выделяют пять основных видов зависимости концентрации от времени [4]. Ступенчатый вид (рис.1а) характерен для городской канализации. Периодический вид (рис.1б) встречается на производстве и отражает циклическое повторение технологических процессов. Треугольный вид (рис.1в) характеризует поступление загрязнений, собирающихся с территории при прохождении дождя. Прямоугольный вид (рис.1г) связан с накоплением стоков и последующим залповым сбросом в водный объект. Данная схема используется при невозможности сброса сточных вод, например, в периоды времени, связанные с рыбохозяйственным режимом. Последний вид является неупорядоченной функцией, которая описывает поступление в период аварийных сбросов, вызванных перегруженностью очистных сооружений во время сильных дождей или чрезвычайных ситуаций на инженерных сетях и насосных станциях (рис.1 д). Такой вид аварии носит случайный характер и может привести к вынужденным сбросам концентрированных сточных вод в ближайшие водные объекты, имеющие малый очистительный потенциал. Подобные сбросы очень опасны и могут привести к значительному ущербу экологии водоема. Анализируя рассмотренные зависимости, можно отметить, что на практике работа выпуска в определенные периоды времени может быть неэффективна. Поэтому, рассматривая работу выпуска сточных вод в конкретных условиях, необходимо производить оценку его функционирования, задаваясь различными режимами эксплуатации для поиска способов оптимизации.

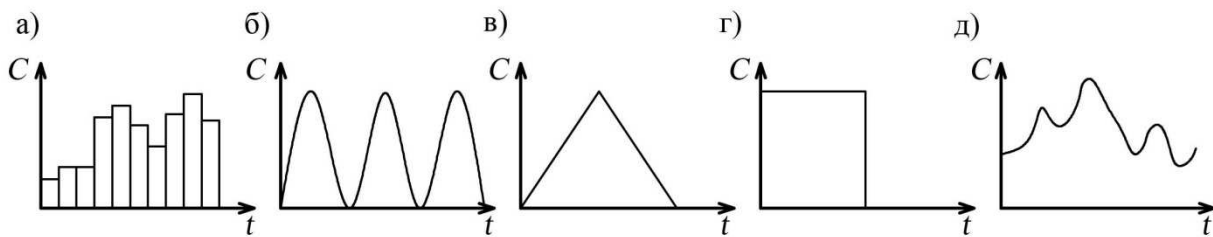


Рис. 1. Эпюры поступления загрязнений в водный объект [4]

а) ступенчатая эпюра; б) периодическая эпюра; в) треугольная эпюра; г) прямоугольная эпюра; д) неупорядоченная функция.

Как правило, повсеместно в качестве сбросных сооружений применяются рассеивающие выпуски, позволяющие интенсифицировать процесс начального разбавления. В Санкт-Петербурге наиболее известны выпуски на ЦСА и ССА [5]. Так как в условиях водотока основное разбавление малоэффективно, поэтому единственным способом повышения кратности общего разбавления является возможность интенсификации процесса начального разбавления. Например, в работе А. Д. Гиргидова [1] исследуется влияние на процесс начального разбавления вида насадка, применяемого на патрубке оголовка, и доказана эффективность использования конически расходящегося оголовка. В данной работе авторами предлагается вариант с отключением отдельных оголовков на распределительном трубопроводе, и, при этом, оценивается изменение условий смешения в водотоке.

Рассмотрим работу рассеивающего выпуска для условий реки, включающего $N = 20$ оголовков (рис. 2). Конструктивные размеры выпуска принимаются на основе расчетного примера из монографии Н. Н. Лапшева [2]. Диаметр распределительной трубы составляет $d_T = 0,5$ м. Диаметр оголовка равен $d_1 = 0,25$ м, а выпускающего отверстия $d_0 = 0,1$ м. Оголовки располагаются на расстоянии $l = 4$ м друг от друга. Выпуск располагается в русле и сбрасывает стоки с расходом $0,4 \text{ м}^3/\text{с}$. Средняя скорость потока воды в реке $V_{п} = 0,35 \text{ м/с}$, средняя глубина $H = 3 \text{ м}$ и ширина реки $B = 100 \text{ м}$. Контрольный створ в соответствии с санитарными правилами располагается на расстоянии 500 м от точки сброса вниз по течению [6]. На рис. 2 представлены два режима эксплуатации выпуска. При втором режиме выводятся из работы все оголовки, имеющие четный номер. Еще не производя расчет разбавления, видно, что в зонах отключения оголовков образуется более широкое пространство b , позволяющее большим объемам чистой воды контактировать с загрязненными струями.

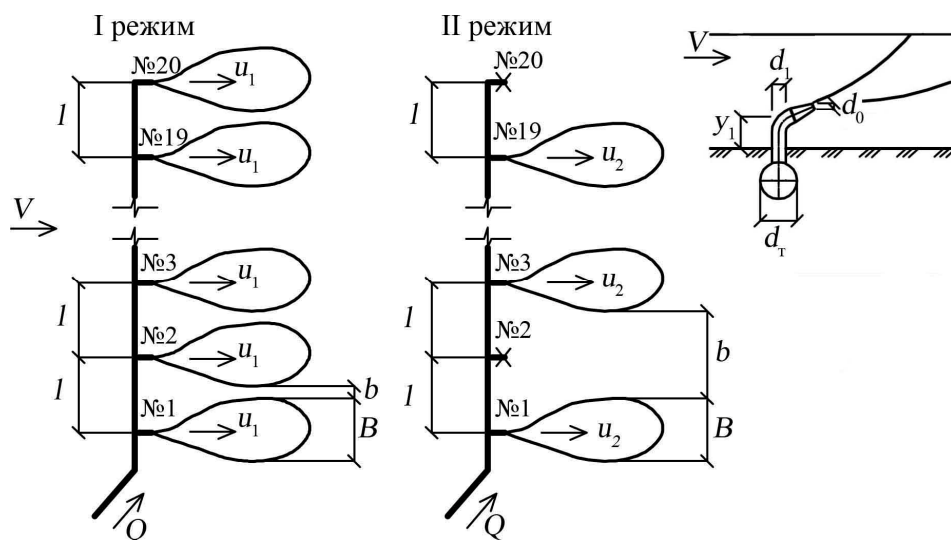


Рис.2. Режимы функционирования рассеивающего выпуска

$u_{1,2}$ – скорость истечения при I и II режиме, м/с; l – расстояние между оголовками, м; B – ширина пятна начального облака загрязнения, м; b – расстояние между краями облаков загрязнения, м; y_1 – положение выпускающего отверстия над дном, d_t – диаметр распределительного трубопровода, м; d_1 – диаметр оголовка, м; d_0 – диаметр выпускающего отверстия.

Для расчета начального разбавления нами использовалась методика для сосредоточенных и рассеивающих выпусков [2], в основу которой закладывается зависимость:

$$n_H = \frac{0,248}{1-m} \cdot \bar{d}^2 \cdot \left[\sqrt{m^2 + 8,1 \cdot \frac{1-m}{\bar{d}^2}} - m \right], \quad (1)$$

где: m^2 – отношение скоростных напоров; \bar{d} – относительный диаметр загрязненной струи.

Методика расчета основного разбавления основывается на решении уравнения турбулентной диффузии:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + V_x \frac{\partial C}{\partial x} + V_y \frac{\partial C}{\partial y} + V_z \frac{\partial C}{\partial z} = D_x \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + D_y \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + D_z \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} - k_1 \cdot C, \quad (2)$$

где: C – концентрация сточных вод, мг/л; x, y, z – продольная, поперечная и вертикальная ось водного объекта; t – время, с; D_x, D_y, D_z – коэффициент дисперсии в продольном, поперечном и вертикальном направлениях, m^2/s ; k_1 – коэффициент неконсервативности $1/s$;

Для решения задачи о распространении примеси в условиях реки авторами было получено аналитическое решение уравнения (2). Полученная функция представляет собой ряды Фурье и позволяет рассчитать значение концентрации в любой точке живого сечения с течением времени.

$$C(x, y, z, t) = \exp \left(-k_1 \cdot t + \frac{u_x \cdot \left(x - \frac{u_x \cdot t}{2} \right)}{2 \cdot D_x} + \frac{u_y \cdot \left(y - \frac{u_y \cdot t}{2} \right)}{2 \cdot D_y} + \frac{u_z \cdot \left(z - \frac{u_z \cdot t}{2} \right)}{2 \cdot D_z} \right) \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{q=1}^{\infty} \frac{8}{A \cdot \sqrt{\frac{D_x}{D_y} B} \cdot \sqrt{\frac{D_x}{D_z} H}} \cdot \int_0^A \int_0^B \int_0^H C'(x, y, z) \cdot \cos \frac{n \cdot \pi}{2 \cdot A} x \cdot \cos \frac{m \cdot \pi}{\sqrt{\frac{D_x}{D_y} B}} y \cdot \cos \frac{q \cdot \pi}{\sqrt{\frac{D_x}{D_z} H}} z dx dy dz \cdot \exp \left(-a^2 \cdot \pi^2 \cdot \left(\frac{n^2}{4 \cdot A} + \frac{m^2}{\frac{D_x}{D_y} B^2} + \frac{q^2}{\frac{D_x}{D_z} H^2} \right) \cdot t \right) \cdot \cos \frac{n \cdot \pi}{2 \cdot A} x \cdot \cos \frac{m \cdot \pi}{\sqrt{\frac{D_x}{D_y} B}} y \cdot \cos \frac{q \cdot \pi}{\sqrt{\frac{D_x}{D_z} H}} z \quad (3)$$

где: $C'(x, y, z)$ – функция начального распределения концентрации вещества; A – створ полного растворения примеси; B – ширина реки, м; H – глубина реки, м;

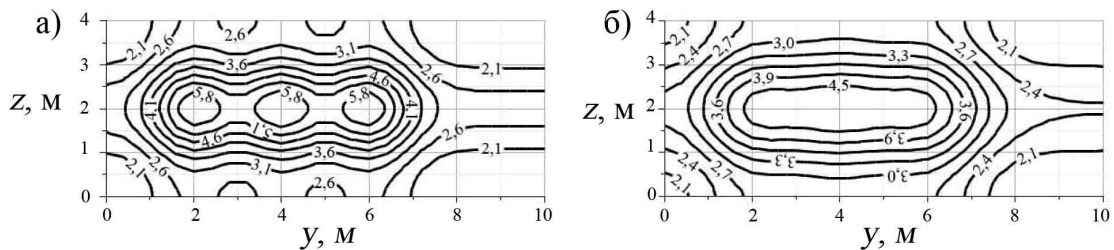


Рис. 3. Структура облака концентрации в реке при а) $t = 1$ с, б) $t = 2$ с

В качестве примера представляем результат моделирования поля концентрации в живом сечении реки. На рис.3 представлены поля, которые разбиваются линиями равных концентраций. В данном случае видны три очага максимальной концентрации, объединяющиеся с течением времени в одно облако. На графиках также видно, что изолинии стремятся выпрямиться, это подтверждается фактом того, что с протеканием процесса разбавления на натурных экспериментах концентрация по глубине постепенно выравнивается.

Далее производится расчет начального и основного разбавления для двух представленных режимов (рис.2), а также дополнительно рассматривается случай $N/4$, когда останется только пять функционирующих оголовков, расположенных друг от друга на расстоянии 20 м. Значения кратности начального разбавления n_n представлены в таблице 1.

Таблица 1. Расчет кратности начального разбавления

№, I	Кол-во	l, м	u, м/с	\bar{d}	m	n_n	f(H/d)	n_n^*
I	N	4	2,5	40	0,137	6,9	0,92	6,6
II	N/2	8	5,1	80	0,069	13,8	0,55	7,7
III	N/4	20	10,2	200	0,034	28,5	0,25	7,1

$f(H/d)$ – функция для учета фактора стесненности струи (определяется по номограмме [3]);

n_n^* – кратность начального разбавления с учетом стеснения струи стенками русла.

Из табл. 1 видно, что за счет перераспределения расходов сточной воды происходит увеличение скорости в 2 раза. За счет этого величина кратности начального разбавления для режима II возрастает на 16,5 % с учетом фактора стеснения. По режиму III отмечается спад разбавления за счет значительной величины диаметра струи. В данном случае наличие глубины, сравнимой с диаметром струи, уменьшает кратность начального разбавления и добиться значимого эффекта достаточно сложно. При увеличении же параметра глубины H можно получить существенную разницу по начальному разбавлению между I, II и III режимами. Исходя из этого, можно заключить, что регулирование работы выпуска целесообразно проводить в водных объектах, где глубина в точке сброса равна или превышает расстояние между работающими оголовками. Также, в результате отключения некоторых оголовков, естественным образом возрастает величина сопротивления, и необходимо производить гидравлический расчет для проверки возможности функционирования выпуска, если он работает в напорно-самотечном режиме.

Для определения кратности основного разбавления n_0 вычислили по известным зависимостям коэффициенты диффузии для реки [3], которые составили $D_x = 31,5 \text{ м}^2/\text{с}$, $D_y = D_z = 0,005 \text{ м}^2/\text{с}$. Для сравнения кроме использования предлагаемой модели нами был произведен расчет основного разбавления по нормативной методике [7]. Для моделирования мы задались концентрацией в сточных водах $C = 100 \text{ мг/л}$. В результате получены значения кратности основного n_0 и общего разбавления $n = n_0 \cdot n_H$ (таблица 2).

Таблица 2. Расчет кратности общего n и основного разбавления n_0

№, п/п	нормативная методика					модельный расчет					
	α	Q_H , $\text{м}^3/\text{с}$	γ	n_0	n	$C_{\text{нач}}$, мг/л	C , мг/л			n_0	n
							10м	100м	500м		
I	0,358	2,6	0,258	12,5	82,6	15,9	4,246	1,628	0,711	22,4	147,8
II	0,358	3,1	0,287	11,9	91,9	15,9	4,451	1,703	0,735	21,6	166,3
III	0,358	2,84	0,271	12,2	86,6	15,9	4,600	1,779	0,795	20,0	142,0

α – параметр, характеризующий условия сброса сточных вод (расположение выпуска, извилистость реки), является одинаковым для двух режимов;

γ – коэффициент смешения; Q_H – расход в сечении начального разбавления.

Из табл. 2 видно, что основное разбавление, вычисленное по нормативной методике, имеет существенный санитарный запас по отношению к модельному результату. По сравнению с начальным этап основного разбавления в меньшей степени влияет на снижение концентрации в живом сечении за счет стеснения и ограниченности контакта с объемами чистой воды. В целом общее разбавление по двум способам для режима II увеличивается: по нормативной методике на 11,3 % а при моделировании на 12.5 %. Для режима III общее разбавление снижается из-за малой эффективности начального разбавления.

Помимо представленных схем регулирования можно предложить отключать оголовки таким образом, чтобы оставшиеся работающие стояли подряд и располагались строго по центру русла. Так, например, если у нас остается $N/2$, то 10 оголовков остаются функционировать, а 5 оголовков с двух сторон по направлению к берегу отключаются. Таким образом, уменьшается область сброса сточных вод. Представляем аналогичные табличные данные расчета начального и основного разбавления.

Таблица 3. Расчет кратности начального разбавления

№, I	Кол-во	l , м	u , м/с	\bar{d}	m	n_H	$f(H/d)$	n_H^*	Схема выпуска
I	N	4	2,5	40	0,137	6,9	0,92	6,6	
II*	$N/2$	4	5,1	40	0,069	12,1	0,92	11,1	
III*	$N/4$	4	10,2	40	0,034	18,0	0,92	16,6	

В последнем столбце штриховкой указана зона действующих оголовков, расположенных подряд.

Таблица 4. Расчет кратности общего n и основного разбавления n_0

№, п/п	нормативная методика					модельный расчет					
	α	Q_H , м ^{3/с}	γ	n_0	n	$C_{нач}$, мг/л	C , мг/л			n_0	n
							10м	100м	500м		
I	0,358	2,6	0,258	12,7	83,8	15,9	4,246	1,628	0,711	22,4	147,8
II*	0,358	4,44	0,366	10,5	116,6	15,9	3,396	1,299	0,559	28,4	315,2
III*	0,358	6,64	0,459	8,9	147,7	15,9	3,085	1,170	0,482	33,0	548,8

По результатам, представленным в табл. 3 и 4, видно, что при уменьшении зоны влияния сброса, кроме интенсификации начального разбавления, наблюдается повышение кратности основного разбавления на 26,8 % для II* режима и на 47 % для III*.

Гидравлический расчет выпуска сточных вод включает определение всех потерь по движению воды. Важным фактом является независимость характера пьезометрической линии от скорости истечения жидкости [2]. При расчете необходимо закладывать наиболее высокий уровень вод.

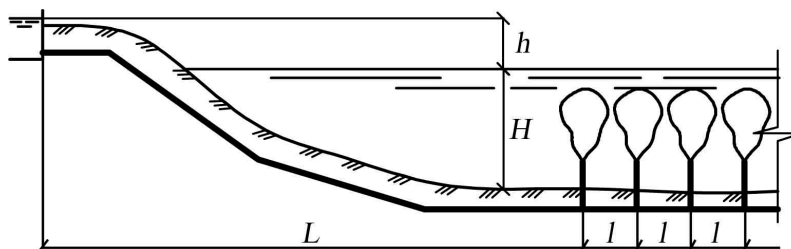


Рис. 4. Схема сброса сточных вод

L – расстояние от колодца до первого оголовка, м; l – расстояние между оголовками, м; h – разница между уровнем воды в водоеме и в колодце.

На рис. 4 представлена схема расположения выпуска. Как видно, в число потерь входят потери по длине в трубопроводе, подводящем сточные воды к выпуску, потери в оголовке и при выпуске в водоем. Потери напора в распределительной трубе не рассматриваются, поскольку при расчете рассеивающего выпуска устанавливается оголовок, имеющий наибольшее значение расхода. По этому расходу определяется скорость истечения и затем рассчитывается потребный напор на всю распределительную часть [2]. При изменении скорости истечения существенное влияние имеет величина потери на выход. В случае напорно-самотечного режима применение регулирования ограничивается условием превалирования разницы уровней h над величиной возможных потерь напора при сбросе $h_{\text{вып}}$.

В заключение можно сделать следующий вывод:

В работе предложены варианты оптимизации работы рассеивающего выпуска. Проведен расчет начального и основного разбавления для каждого режима эксплуатации с помощью известных и апробированных методик. При сравнении результатов показано повышение эффективности разбавления сточных вод при отключении части оголовков в условиях рек. При решении инженерной задачи на стадии проектирования или анализе функционирования действующего выпуска для улучшения эффективности работы необходимо комплексно оценивать все факторы и производить гидравлический расчет выпуска.

Список литературы

1. Гиргидов А. Д. Механика жидкости и газа (гидравлика): Учебник для вузов. 3-е изд., испр. и доп. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2007. 545с.
2. Лапшев Н. Н. Расчеты выпусков сточных вод. – М.: Стройиздат, 1977. – 79с.
3. Лапшев Н. Н., Безобразов Ю. Б. Методы прогноза качества вод: Учебн. пособие. – Л.: ЛИСИ, 1990. – 57 с.
4. Отведение и очистка сточных вод Санкт-Петербурга / Колл. авторов под общей редакцией Ф. В. Кармазинова. Изд. 2-ое, доп. и перераб. – СПб.: Изд-во «Новый журнал», 2002. – 683 с.
5. Приказ МПР РФ от 17 декабря 2007 г. N 333 «Об утверждении методики разработки нормативов допустимых сбросов веществ и микроорганизмов в водные объекты для водопользователей».
6. СанПиН 2.1.5.980-00. Водоотведение населенных мест. Гигиенические требования к охране поверхностных вод. Введ. 2001-01-01. – М., 2001. – 12 с.

7. Сауди Мохаммед. Исследование нестационарного сброса сточных вод в водотоки на базе математической модели: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.04: защищена 26.05.1998 / Сауди Мохаммед. – СПб., 1998. – 171 с.

Рецензенты:

Васильев Виктор Михайлович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой гидравлики. Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет», г. Санкт-Петербург.

Гиргидов Артур Давидович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой гидравлики. Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет», г. Санкт-Петербург.