

Совершенствование методики оптимизации и разработка предложения по созданию единой схемы водоотведения центральной экологической зоны байкальской природной территории на примере Слюдянского района Иркутской области

© Р.В. Чупин^a, М.М. Пукемо^b, Е.С. Мелехов^c, В.Р. Чупин^d

^{a,c,d}Иркутский национальный исследовательский технический университет,

г. Иркутск, Российская Федерация

^bООО «Альта-Групп»,

г. Москва, Российская Федерация

Резюме: Цель работы заключается в разработке методики и методов оптимизации структуры и параметров районных систем водоотведения и очистки сточных вод, которые позволяют в комплексе оптимизировать места установки и производительности канализационных очистных сооружений, способы транспортировки стоков от населенных мест на очистные сооружения. Разработки основаны на построении избыточных проектных схем возможных вариантов водоотведения и очистки сточных вод и поиске максимального потока минимальной стоимости. При этом учитываются пропускные способности существующих систем и сооружений, оптимизируются способы реконструкции существующих трубопроводных напорных и безнапорных систем. Предложена методика построения избыточных проектных схем, которая формируется путем наложения вариантов, намеченных проектировщиками, что исключает заведомо не реализуемые варианты, и учитывает местные преграды и препятствия. На избыточной схеме решается задача поиска максимального потока минимальной стоимости. В итоге определяются наилучшие по приведенным затратам и затратам жизненного цикла места устройства очистных сооружений и их мощность, вид транспортировки сточных вод на очистные сооружения, оптимальная трасса. Методика и метод позволили обосновать схему водоотведения населенных мест центральной экологической зоны южной части озера Байкал. Разработаны новая методика и методы оптимизации районных систем водоотведения, которые, в отличие от существующей методологии проектирования, позволяют определять оптимальные варианты местоположения и мощности очистных сооружений, виды транспортирования сточных вод, оптимальные трассы и оптимальную степень централизации отведения и очистки сточных вод. С помощью этих методик и методов удалось решить важнейшую задачу защиты Байкала от антропогенного загрязнения.

Ключевые слова: методика и методы оптимизации районных систем водоотведения, схема канализования центральной экологической зоны оз. Байкал

Информация о статье: Дата поступления 25 декабря 2018 г.; дата принятия к печати 22 января 2019 г.; дата онлайн-размещения 29 марта 2019 г.

Для цитирования: Чупин Р.В., Пукемо М.М., Мелехов Е.С., Чупин В.Р. Совершенствование методики оптимизации и разработка предложений по созданию единой схемы водоотведения центральной экологической зоны байкальской природной территории на примере Слюдянского района Иркутской области. *Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость*. 2019;9(1): 144–157. DOI: 10.21285/2227-2917-2019-1-144-157.

Unified wastewater disposal scheme for the central Baikal ecological zone on the example of the Slyudyansky District of the Irkutsk Region: methodological optimisation and design proposal

Roman V. Chupin, Mikhail M. Pukemo, Evgeny S. Melekhov, Viktor R. Chupin

Irkutsk National Research Technical University,

Irkutsk, Russian Federation

Alta Group Ltd,

Moscow, Russian Federation

Abstract: The aim of the work is to develop techniques and methods for optimising the structure and parameters of district wastewater disposal and treatment systems. These methods can optimise the location of wastewater treatment plants, increase their performance and enhance techniques for moving wastewater from populated areas. The developed approach is based on the construction of redundant design schemes for possible wastewater disposal and treatment options as well as the search for schemes to permit maximum flow at minimum cost. This approach takes into account the capacity of existing systems and structures. Additionally, methods for the reconstruction of existing pressure and free-flow pipeline systems are optimised. A proposed methodology for the construction of redundant design schemes is formed by the juxtaposition of options outlined by the designers, excluding options that are obviously not realisable and taking into account local obstacles. The redundant scheme solves the problem of establishing maximum flow at minimum cost. As a result, optimised locations for wastewater treatment plants and their capacity, as well as the type of wastewater transportation to the wastewater treatment plant and the optimal route are determined according to the given and life-cycle costs. The method and methodology support the justification of the wastewater disposal scheme in the populated areas of the central ecological zone of the southern part of Lake Baikal. In contrast with existing design methodology, the developed methods and methodologies for optimising district wastewater disposal systems allow the optimal location and power of wastewater treatment plants, types of wastewater transportation, optimal routes and the optimal degree of centralisation of wastewater disposal and treatment to be determined. With the help of these techniques and methods, it was possible to solve the most important task of protecting Lake Baikal from anthropogenic pollution.

Keywords: methodics and methods of optimization of regional systems of water disposal, scheme of sewage central ecological zone of lake Baikal

Information about the article: Received December 25, 2018; accepted for publication January 22, 2019; available online March 29, 2019.

For citation: Chupin R.V., Pukemo M.M., Melekhov E.S., Chupin V.R. Unified wastewater disposal scheme for the central Baikal ecological zone on the example of the Slyudyansky District of the Irkutsk Region: methodological optimisation and design proposal. *Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost'* = *Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate*. 2019;9(1):144–157. (In Russ.) DOI: 10.21285/2227-2917-2019-1-144-157.

Введение

На берегу о. Байкал со стороны Иркутской области в ЦЭЗ проживает 56 236 чел (городское – 42234, сельское – 14002). В южной части 39.4 тыс., в средней 7.0 тыс. и в северной 7.4 тыс. чел. Наиболее крупные населенные пункты: Слюдянка – 18 720 чел., Байкальск – 12 738, Култук – 3 715 чел. На острове Ольхон проживает 1672 чел. В остальных населенных пунктах (их около 40) проживает от 5 до 1000 чел. На территории Иркутского берега Байкала располагается 350 туристических баз, вместительностью каждая от 10 до 500 чел. Общее количество койка-мест составляет 9944. На острове Ольхон таких баз 190, на Малом море – 80. С каждым годом их количество (особенно гостевых домиков) увеличивается. Очистные сооружения имеются в следующих населенных пунктах: Листвянка, Слюдянка, Байкальск, Култук, Ангасолка. Современными являются КОС г. Байкальска, однако и они не обеспечивают очистку сточных вод до требований Приказа Минприроды России от 5 марта 2010 г. № 63. Наиболее значимое КОС, по количеству поступающих стоков, является КОС города Слюдянка. В остальных населенных пунктах имеются выгребные ямы при школах, больницах, детских садах и туристических базах. Основное население проживает в частных, в основном, в деревянных домах, и пользуется примитивными уличными туалетами – уборными. Основные конструкции выгребных ям – это одно, три ж/б кольца без дна, емкостью 2– 6 м³. Как следствие, большая часть стоков дренирует в грунт и далее о. Байкал. Суточный объем сточных вод составляет 12 216 м³, из которого 9 673 м³ проходят через очистные со-

оружения, 2 543 м³ попадают в грунт и далее в оз. Байкал. С учетом разработанных и утвержденных генпланов населенных мест центральной экологической зоны о. Байкал Иркутской области перспективный объем стоков составляет 13 077 м³/сут.

Наибольшее антропогенное воздействие на оз. Байкал оказывает хозяйственная деятельность Слюдянского района. В табл. 1 представлены проектные мощности и фактическое поступление сточных вод на существующее КОС.

Наиболее современными и автоматизированными являются КОС города Байкальска, которые после небольших реконструкций, будут соответствовать требованиям к сбросу стоков в озеро Байкал, обозначенные в приказе Минприроды России от 5 марта 2010 г № 63 "Об утверждении нормативов предельно допустимых воздействий на уникальную экологическую систему озера Байкал и перечня вредных веществ, в том числе веществ, относящихся к категориям особо опасных, высоко опасных, опасных и умеренно опасных для уникальной экологической системы озера Байкал". КОС города Слюдянка, поселков Култук и Ангасолка требуют полной замены из-за неудовлетворительного состояния и несоответствующей технологии очистки сточной воды.

Таблица 1

Производительности канализационных очистных сооружений

Table 1

Capability of sewage treatment plants

Зоны	Муниципальные образования	Проектная м ³ в сут.	Фактическая, м ³ в сут.	Рез-вы м ³ /сут.	Сброс очищ. сточных вод
1	КОС «Город» КОС «Квартал» в г. Слюдянка	6000 800	2116.0 402.72	3884.0 397.28	Пахабиха Байкал
2	КОС г. Байкальск	12000	6156	5844	Байкал
3	КОС п. Култук КОС п. Ангасолка	400	270	130	Поля фильт. и Байкал

Методы

Предлагается разработать новую схему водоотведения и очистки сточных вод от населенных мест и городов Слюдянского района. Эта схема должна обеспечить требования по сбросу очищенных сточных вод оз. Байкал за счет применения новых и доступных технологий очистки сточных вод, либо за счет отведения очищенных сточных вод в другие водоразделы, в том числе, в реку Иркут. Для решения этой задачи предлагается новая методика и метод оптимизации.

Общепринятыми критериями оптимизации и сравнения вариантов являются приведенные (к одному году) затраты на строительство и эксплуатацию систем водоотведения, которые определяются следующим образом:

$$Z_{пр} = K \cdot E + \mathcal{E}_3, \quad (1)$$

где $Z_{пр}$ – приведенные затраты, тыс. руб./год; K – капиталовложения в сеть, тыс. руб., определяются на основании укрупненных нормативов цен строительства (Приказ Минстроя РФ № 837 от 01 июня 2017 года «Об утверждении укрупненных сметных нормативов», НЦС-81-02-14-2017 по сооружениям водоснабжения и канализация); E – коэффициент эффективности капиталовложений, который в условиях рыночной экономики отождествляется с банковскими процентами; $\mathcal{E}_3$ – годовые эксплуатационные затраты (тыс. руб./год), рассчитываются на основе рекомендаций (Приказ Госстроя РФ от 22.03.1999. №66).

В работе, для **каждого трубопроводного участка**, длиной 1 км получена зависимость эксплуатационных затрат от объемов транспортируемых сточных вод (X , в м³/с):

$$\mathcal{E}_3 = 0,116 \cdot K + C_{\text{элк}} + 1,125 \cdot 3П_{\text{ср}} \cdot x^{0,3} + 31536 \cdot C_{\text{н,см}} \cdot x. \quad (2)$$

Где $3П_{\text{ср}}$ – средняя заработная плата по предприятию, $C_{\text{н,см}}$ – водный налог. С учетом информации, приведенной в укрупненных нормативах цен строительства НЦС -81-02-14-2017 и гидравлических характеристик трубопровода, получена зависимость капиталовложений от расхода и скорости (v) транспортируемой сточной воды в расчете на 1 км длины:

$$K = (34796,4 \cdot x \cdot v^{-1} + 8346,6 \cdot x^{0,5} \cdot v^{-0,5} + 2537,9) \cdot L \quad (3)$$

Формула получена для полиэтиленовых труб при разработке сухого грунта на глубину 3 м (что характерно для Иркутской области). Затраты электроэнергии приведены к участку трубопроводной сети, длиной 1 км и выражены как функция расхода и скорости движения сточной воды:

$$C_{\text{элк}} = 108 \cdot Z_{\text{элк}} \cdot (0,000642 \cdot x_i^{0,387} \cdot v_i^{2,387} \cdot L_i \cdot 1000) \quad (4)$$

Где $Z_{\text{элк}}$ – стоимость 1 кВт час. В итоге, приведенные затраты:

$$3_{\text{пр}} = 0,236 \cdot K + C_{\text{элк}} + 1,125 \cdot 3П_{\text{ср}} \cdot x^{0,3} \quad (5)$$

При постоянных эксплуатационных расходах затраты жизненного цикла можно представить следующим образом [1]:

$$ЗЖЦ = K + T \cdot \mathcal{E}_3, \quad (6)$$

Где: T срок службы системы водоотведения, в годах, принимается равным сроку службы самого долговечного из элементов системы водоотведения, K – капиталовложения, равные единовременным затратам, плюс затраты на восстановление отдельных элементов системы, чей срок жизни меньше расчетного (кратные затраты).

С учетом значений эксплуатационных затрат (2),(4), затраты жизненного цикла (в тыс. руб.) можно представить:

$$ЗЖЦ = K + T \cdot (0,116 \cdot K + C_{\text{элк}} + 1,125 \cdot 3П_{\text{ср}} \cdot x^{0,3}) \quad (7)$$

Таким образом, получены зависимости приведенных затрат и затрат жизненного цикла как функции расхода и скорости транспортируемой сточной воды, длины трубопровода и удельных затрат электроэнергии. СП 31.13330.2012 и ряд других методических указаний рекомендуют скорость движения сточной воды в напорном режиме принимать в диапазоне 1,5 – 3 м/с. Однако в каждом конкретном случае оптимальную скорость можно определять расчетным путем. Для этого необходимо взять частную производную приведенных затрат и затрат жизненного цикла по скорости и приравнять к нулю. Далее полученное уравнение разрешить относительно скорости.

Единичную стоимость электроэнергии будет изменять от наименьшей величины для Иркутской области – 1.06, до максимальной для Чукотки – 8.2 руб. за кВт час. Результаты численных экспериментов представлены в табл. 2, из которой следует, что тариф на электроэнергию оказывает существенное влияние на оптимальные значения скоростей. Протяженность сетей практически не влияет на скорость движения воды. Критерий затрат жизненного цикла снижает оптимальную скорость на 30 %.

Evaluation of optimal water flow rates in pressure pipelines

Стоимость электроэнергии, руб. за Квт час $Z_{\text{элк}}$	Оптимальная скорость движения воды (м/с) для расхода в 1 м ³ /с					
	Для критерия приведенных затрат			Для затрат жизненного цикла (T=50лет)		
	L=1км	L=50км	L=100км	L=1км	L=50км	L=100км
1	3,40	3,35	3,30	2,85	2,80	2,80
2	2,78	2,74	2,72	2,31	2,30	2,30
3	2,40	2,40	2,37	2,08	2,07	2,07
4	2,23	2,20	2,20	1,89	1,89	1,89
5	2,10	2,07	2,04	1,78	1,79	1,79
6	2,00	2,00	1,98	1,70	1,68	1,68
7	1,90	1,88	1,88	1,60	1,58	1,58
8	1,80	1,80	1,78	1,54	1,50	1,50
9	1,78	1,77	1,77	1,49	1,49	1,48

Следовательно, оптимальные скорости можно принимать в диапазоне от 1 до 3 м/с в зависимости от стоимости электроэнергии того региона, для которого проектируется система водоснабжения [2].

Оценка затрат на транспортировку сточных вод железнодорожным транспортом:

$$Z_{np} = 14,4 \cdot x \cdot C_m \cdot \left(\frac{60 + L}{V_e} \right) + 411355,58 \cdot \frac{x \cdot L}{V_e} \quad (8)$$

где x в м³/с, L длина в км, C_m - стоимость новой железнодорожной цистерны (тыс. руб.), V_e - емкость ЖД цистерны в м³.

Затраты жизненного цикла:

$$ЗЖЦ = 120 \cdot x \cdot C_m \cdot \left(\frac{60 + L}{V_e} \right) + T \cdot 411355,58 \cdot \frac{x \cdot L}{V_e} \quad (9)$$

Оценка затрат на транспортировку сточных вод автомобильным транспортом:

приведенные затраты:

$$Z_{np} = 1296 \cdot \frac{x \cdot (C_m + C_z)}{V_e} \cdot \left(1 + \frac{2 \cdot L}{45} \right) + 6307200 \cdot \frac{x \cdot L}{V_e} \quad (10)$$

где C_m и C_z - стоимость автоцистерны и гаража (тыс. руб.), V_e - емкость одной автоцистерны в м³.

$$ЗЖЦ = 10800 \cdot \frac{x \cdot (C_m + C_z)}{V_e} \cdot \left(1 + \frac{2 \cdot L}{45} \right) + T \cdot 6307200 \cdot \frac{x \cdot L}{V_e} \quad (11)$$

Для различных способов транспортировки воды и различных условий их строительства и эксплуатации построены функции и приведены их линейные аппроксимации (рис. 1а и 1б). На рис. 1а представлены функции для трубопроводного

и автомобильного транспорта, из которых следует, что до расходов $0.002 \text{ м}^3/\text{с}$ ($430 \text{ м}^3/\text{сут.}$) эффективным транспортом доставки стоков является автотранспорт с объемом цистерны 20 м^3 . При объеме цистерны в 8 м^3 объемы перевозимые автотранспортом уменьшается до величины 0.0015 ($130 \text{ м}^3/\text{сут.}$), (рис. 16).

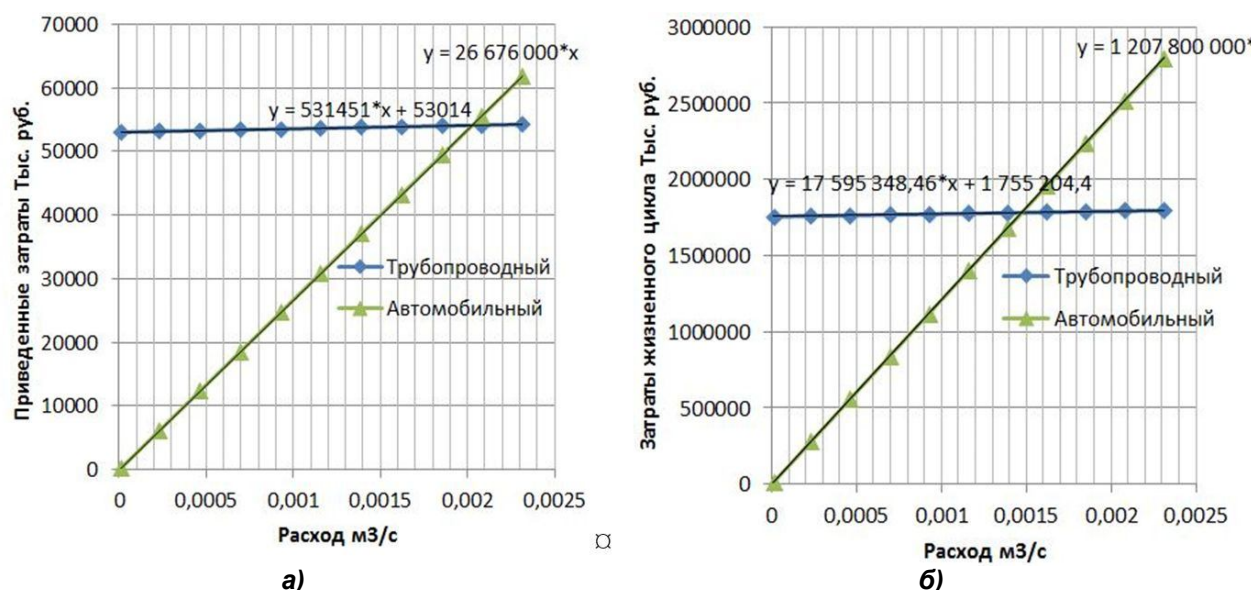


Рис. 1. Приведенные затраты и затраты жизненного цикла для трубопроводного и автомобильного транспорта

Fig. 1. Reduced costs and life cycle costs for pipeline and road transport

Таким образом, если населенный пункт имеет численность свыше 800 человек, то транспортировать сточные воды от него на любое расстояние целесообразно трубопроводным транспортом. При этом внутри населенного пункта от абонентов до резервуара накопителя будет целесообразно транспортировать сточные воды автомобильным транспортом. У абонентов потребуется установка септиков или выгребных ям с водонепроницаемым дном.

Для **канализационных очистных сооружений** капиталовложения в их строительство можно представить в виде следующей зависимости [1–4], которая получена на основе обработки данных по фактически построенным КОС:

$$K = 7029817.47 \cdot X + 300,4. \quad (12)$$

При этом эксплуатационные затраты складываются из $0.05 \cdot K$ – амортизационных отчислений, $0.056 \cdot K$ – на капитальный и текущий ремонт, фонд оплаты труда $0.05 \cdot K$, непредвиденные затраты $0.02 \cdot K$. $\Sigma = 0,176 \cdot K$.

$$\text{Приведенные затраты: } \Sigma_{\text{п}} = 2080825.97 \cdot X + 88.92. \quad (13)$$

$$\text{Затраты жизненного цикла: } \Sigma_{\text{ЖЦ}} = 69892211.21 \cdot X + 2943.92. \quad (14)$$

Стоимость **насосных станций получена** на основе обработки информации, представленной производителями оборудования, и записана как функция от объемов сточной жидкости:

$$K = 19803,6 \cdot x + 873,81$$

Эксплуатационные затраты:

$$\Sigma = 0,216 \cdot K + C_{\text{элк}}$$

Складываются из $0.09 \cdot K$ – амортизационные отчисления, $0.056 \cdot K$ – на капитальный и текущий ремонт, фонд оплаты труда $0.05 \cdot K$, непредвиденные затраты $0.02 \cdot K$.

Годовые затраты электроэнергии, тыс. руб./год:

$$C_{элк} = 108 \cdot z_s \cdot H \cdot x$$

где H – напор насосной станции (м. в. ст.). Используя формулу проф. Ф.А. Шевелёва [12] для вычисления потерь напора, получена зависимость:

$$H = 0,642 \cdot x^{0,617} \cdot v^{2,387} \cdot L + (Z_K - Z_H).$$

Следовательно, затраты электроэнергии составят:

$$C_{элк} = 108 \cdot z_s \cdot x \cdot [0,642 \cdot x^{0,617} \cdot v^{2,387} \cdot L + (Z_K - Z_H)],$$

V – скорость движения воды в трубопроводе, м/с, Z_K , Z_H – геодезические отметки в начале и в конце расчетного участка, м, L – длина, км.

Приведенные затраты:

$$z_{пр} = 6654 \cdot x + 293,6 + 108 \cdot z_s \cdot x \cdot [0,642 \cdot x^{0,617} \cdot v^{2,387} \cdot L + (Z_K - Z_H)] \quad (15)$$

Затраты жизненного цикла:

$$ЗЖЦ = 19804 \cdot x + 873,81 + T \cdot \left[4277,6 \cdot x + 188,74 + 108 \cdot z_s \cdot x \cdot [0,642 \cdot x^{0,617} \cdot v^{2,387} \cdot L + (Z_K - Z_H)] \right] \quad (16)$$

В силу линейности приведенных затрат и затрат жизненного цикла по КОС экономически выгодным вариантом будет строительство их в каждом населенном пункте (если нет ограничений на их производительность и технологии очистки у них одинаковые). Если требования к сбросу сточных вод в различных местах и водоемах различны, то заранее не известно, какой из вариантов устройства КОС и транспортировки на них сточных вод будет экономичнее. Вариантность проектирования является основным инструментом поиска рационального вложения инвестиций в развитие и реконструкцию систем водоотведения и очистки сточных вод. Проектировщики, с учетом накопленного опыта и собственной интуиции всегда пользовались этим инструментом. Но из-за дефицита времени и средств, ограничивались рассмотрением двух, трех и от силы пяти вариантов. Хотя их может быть намного больше, особенно при обосновании структуры сбора и транспортировки сточных вод от населенных пунктов, расположенных на значительных расстояниях друг от друга. Вариантность предлагается учитывать за счет наложения возможных вариантов и формирования графы избыточной схемы. При построении избыточных схем можно заранее избежать заведомо неоптимальные решения и обеспечить возможность генерировать множество допустимых вариантов структуры и параметров систем водоотведения, отличающихся друг от друга затратами. Задача состоит лишь в том, чтобы в этом графе отбраковать не эффективные связи и узлы. Для этих целей предлагается метод, основанный на построении транспортной сети и поиске на ней максимального потока минимальной стоимости (приведенных затрат, затрат жизненного цикла). Для построения транспортной сети все узлы – абоненты (населенные пункты) замыкаются с помощью фиктивных ветвей на общий узел s – входа потоков, а узлы возможных КОС замыкаются на общий фиктивный узел выхода потоков t . При этом для каждого участка транспортной сети назначаются ограничения на их пропускные способности (верхние и нижние). Для фиктивных ветвей входа потоков верхние ограничения соответствуют расчетным объемам сточных вод от населенных пунктов, а для фиктивных ветвей выхода потоков верхние ограничения соответствуют производительностям возможных КОС. Ограничения на потоки проектируемых трубопроводных участков сети и на маршруты автомобильным транспортом не назначаются. По каждому участку сети определяется стоимость единицы потока (стои-

мость транспортировки 1 м^3 сочной жидкости на 1 км длины автомобильным, железнодорожным, водным и трубопроводным транспортом). Для фиктивных ветвей выхода потоков – это стоимости очистки 1 м^3 сточной жидкости. Для фиктивных участков входа потоков стоимости не назначаются, либо принимаются в виде затрат на транспортировку одного м^3 сточной жидкости внутри населенного пункта. С учетом построенной таким образом транспортной сети решается задача поиска максимального потока минимальной стоимости. В результате работы метода определяются оптимальные места положения и производительности КОС, вид транспорта (трубопроводный, автомобильный, водный, железнодорожный), трасса трубопроводной системы, автомобильного, водного и железнодорожного транспорта. При этом возможны варианты полностью централизованной или децентрализованной системы водоотведения и очистки сточных вод.

С учетом полученных зависимостей (1)-(16), можно сформулировать математическую задачу оптимизации структуры и параметров систем водоотведения, как задачу минимизации линейных функций затрат на множестве допустимых значений расходов транспортируемой воды:

$$\sum_{i=1}^n C_i \cdot x_i \rightarrow \min, \text{ при } \underline{e}_i \leq x_i \leq \bar{e}_i, \quad A \cdot x = q_{cp} \quad (17)$$

где x_i – искомый поток на ветви избыточной или транспортной сети; $\underline{e}_i, \bar{e}_i$ – нижние и верхние ограничения на поток x_i ; A – матрица соединений узлов и ветвей сети; q_{cp} – вектор расчетных расходов сточной воды от населенных пунктов, $\text{м}^3/\text{с}$.

Если известна величина выделяемых инвестиций в строительство новых и реконструкцию существующих сетей и сооружений, то дополнительно вводится следующее ограничение:

$$\sum_{i=1}^n C_i \cdot x_i \leq \bar{C} \quad (18)$$

$\bar{C}$ – выделяемые инвестиции в строительство и реконструкцию системы водоснабжения. При решении задачи (17) – (18) используется алгоритм поиска максимального потока минимальной стоимости [10-15]. Работа метода начинается с выбора кратчайшего маршрута от S к t , который соответствует минимальному значению сумме удельных величин стоимости потока, умноженному на длину ветви. Затем величина потока увеличивается с помощью систематического поиска всех возможных маршрутов от S к t . Как только будет найдена одна из таких цепей, поток вдоль нее увеличивается до максимального значения. Алгоритм заканчивает работу и дает максимальный поток, если нельзя найти ни одну цепь, увеличивающую поток. При этом граф распадается на два несвязных подграфа. В итоге выделяемые инвестиции оптимально распределяются в строительство новых и реконструкцию существующих объектов водоотведения, оставшиеся фиктивные ветви укажут на оптимальные места положения и производительности КОС, а оставшиеся участки избыточной схемы – на оптимальную трассу и вид транспорта сточных вод.

Результаты и обсуждения

Для населенных мест Слюдянского района предлагаются следующие варианты [5–9]:

1. Предлагается на месте старой площадки КОС п. Култука осуществить строительство новых КОС, производительностью $5000\text{ м}^3/\text{сут}$ и организовать доставку сточных вод на них тремя видами транспорта (автомобильным, трубопроводным, ЖД транспортом). В новых КОС предлагается применить современную техно-

логию очистки сточных вод до требований рыбхоза. После очистки стоков организуется их переброска трубопроводным или автомобильным транспортом в другой водораздел реки Иркут (в реку Быстрая). На рис. 2 показан ЖД маршрут доставки сточных вод от населенных пунктов «Кругобайкальской» железной дороги до новых КОС в п. Култук.

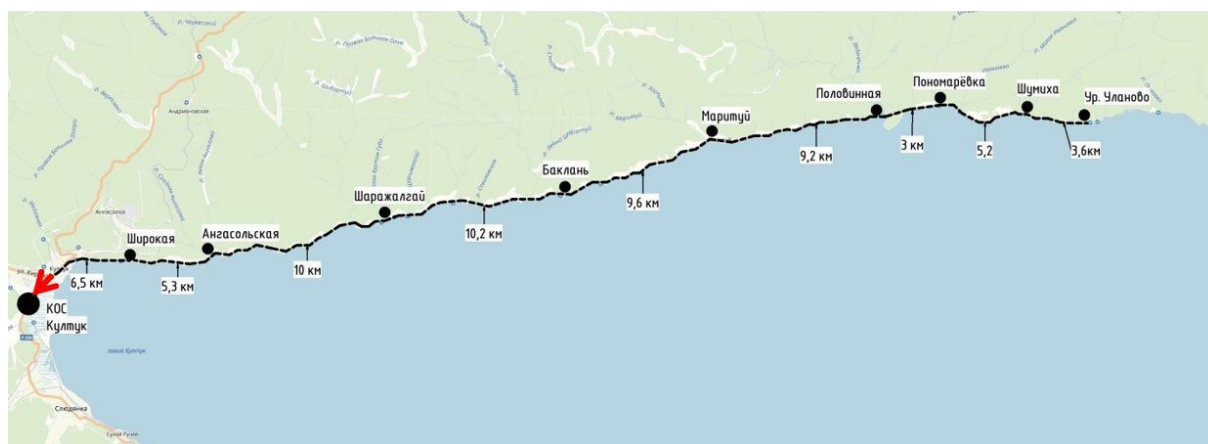


Рис. 2. Схема доставки сточных вод на КОС п. Култук ж/д транспортом
Fig. 2. Scheme of delivery of wastewater to the WWTP of the village of Kultuk by railway

2. Закрываются очистные сооружения в п. Култук, п. Ангасолка и г. Слюдянка. Предлагается модернизировать КОС г. Байкальска в части доведения технологии очистки стоков до требований сброса их в южную часть центральной экологической зоны оз. Байкал (до требований приказа Минприроды № 63) и организовать доставку всех сточных вод района на них автомобильным и трубопроводным транспортом. На рис. 3 показана схема транспортировки стоков на КОС г. Байкальск.

3. В поселке Порт Байкал предлагается организовать централизованную систему водоотведения с устройством КОС в истоке реки Ангара, с последующим сбросом очищенных вод в р. Ангара. Сточные воды от населенных пунктов «Кругобайкальской» ж/д доставлять в п. Порт Байкал железнодорожным транспортом.

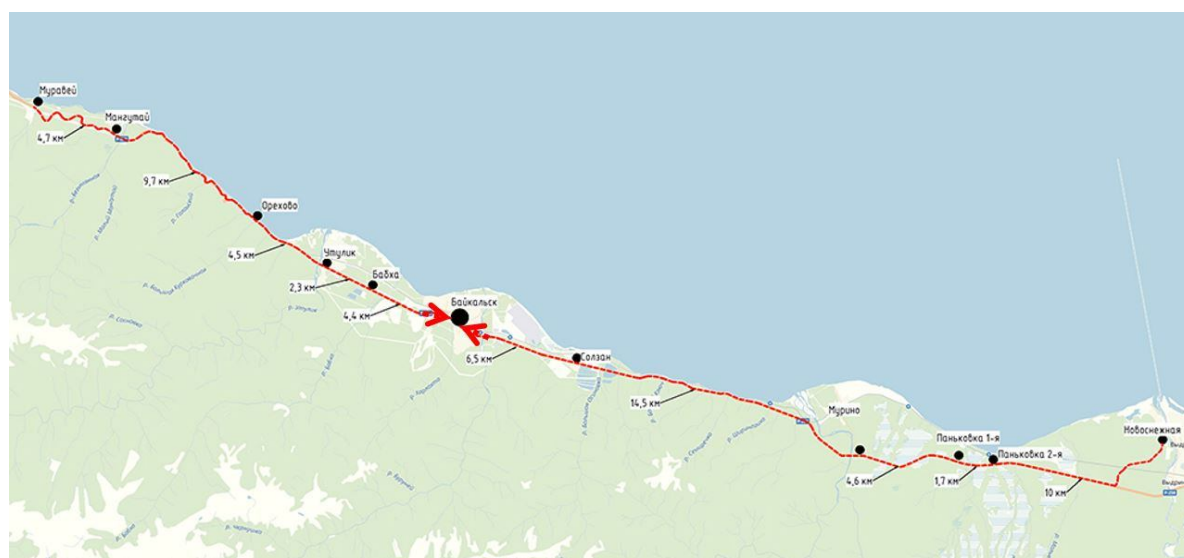


Рис. 3. Избыточная схема водоотведения населенных мест Слюдянского района Иркутской области
Fig. 3. Redundant sewage disposal scheme in populated areas of Slyudyanskii District of Irkutsk Region

4. Возможен вариант строительства новых КОС в п. Култук и городе Слюдянке. После очистки стоков в г. Слюдянке, до рыбохозяйственных требований, предлагается их перебросить трубопроводным транспортом в верховья реки Быстрая.

С учетом четырех намеченных вариантов была построена избыточная схема, основная часть которой представлена на рис. 4.

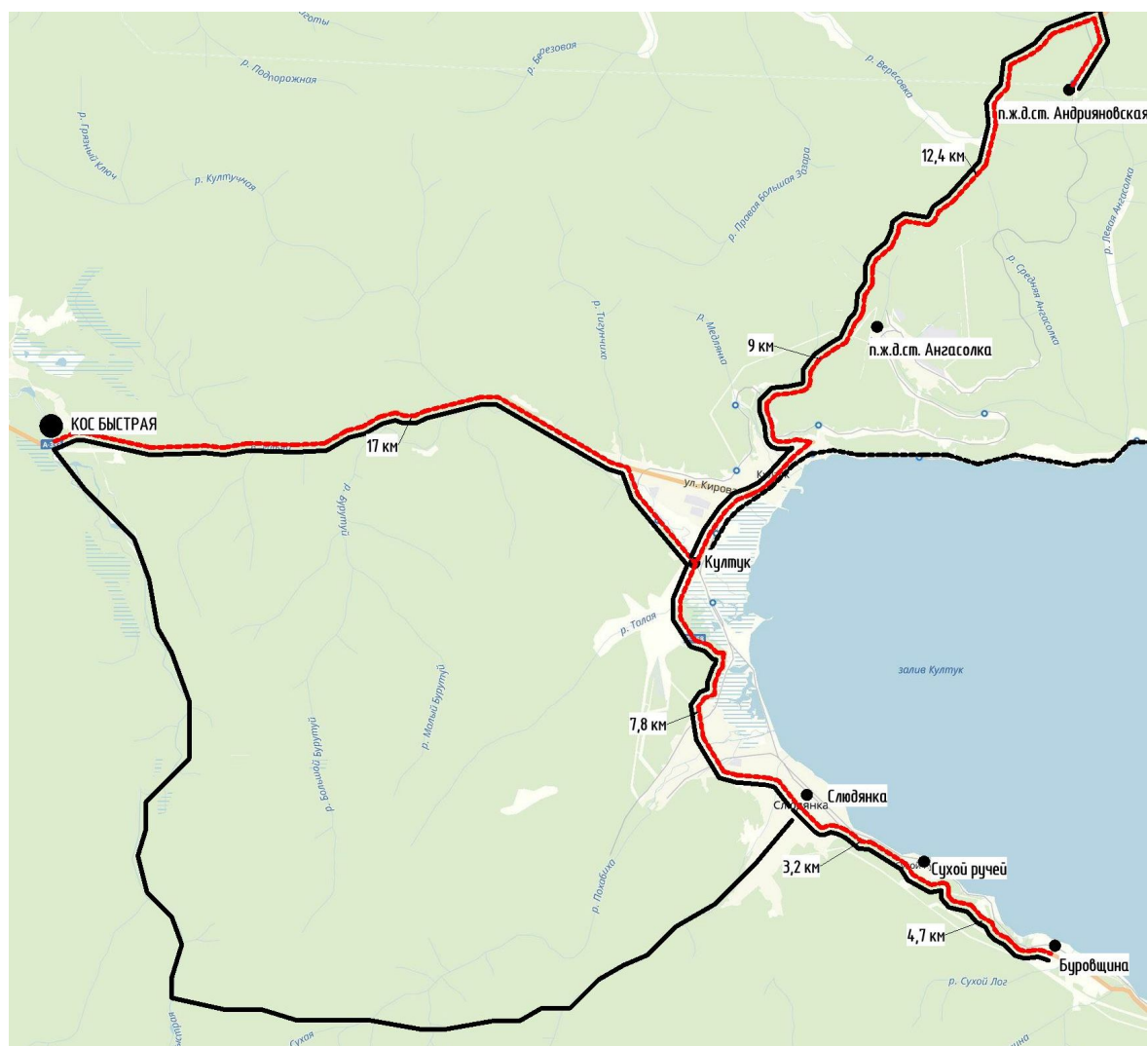


Рис. 4. Избыточная схема водоотведения для населенных мест Слюдянского района, красный цвет – автомобильный транспорт, черный – трубопроводный, прерывистая черная – железнодорожный

Fig. 4. Redundant wastewater disposal scheme for populated areas of Slyudyanskii District, red is the color of road transport, black pipeline, intermittent black – railroad

На основании проведенных расчетов по методики оптимизации (1)-(18) получен вариант, представленный на рис. 5. Согласно этому варианту, стоки от п. Буровщина до насосной станции (КНС) г. Слюдянки будут доставляться автомобильным транспортом, далее стоки от г. Слюдянки до новых КОС п. Култук напорным трубопроводным транспортом. От ж/д станции Андрияновской до новых КОС п. Култук стоки будут доставляться автомобильным транспортом. От урочища Уланово (рис. 2) стоки на новые КОС будут доставляться ж/д транспортом. От поселка Муровей и п. Ново-Снежное (рис. 3) стоки будут автомобильным транспортом доставляться на КОС г. Байкальск. При этом населенные пункты и частный сектор оборудуются герметичными септиками, приемными резервуарами и выгребными ямами.

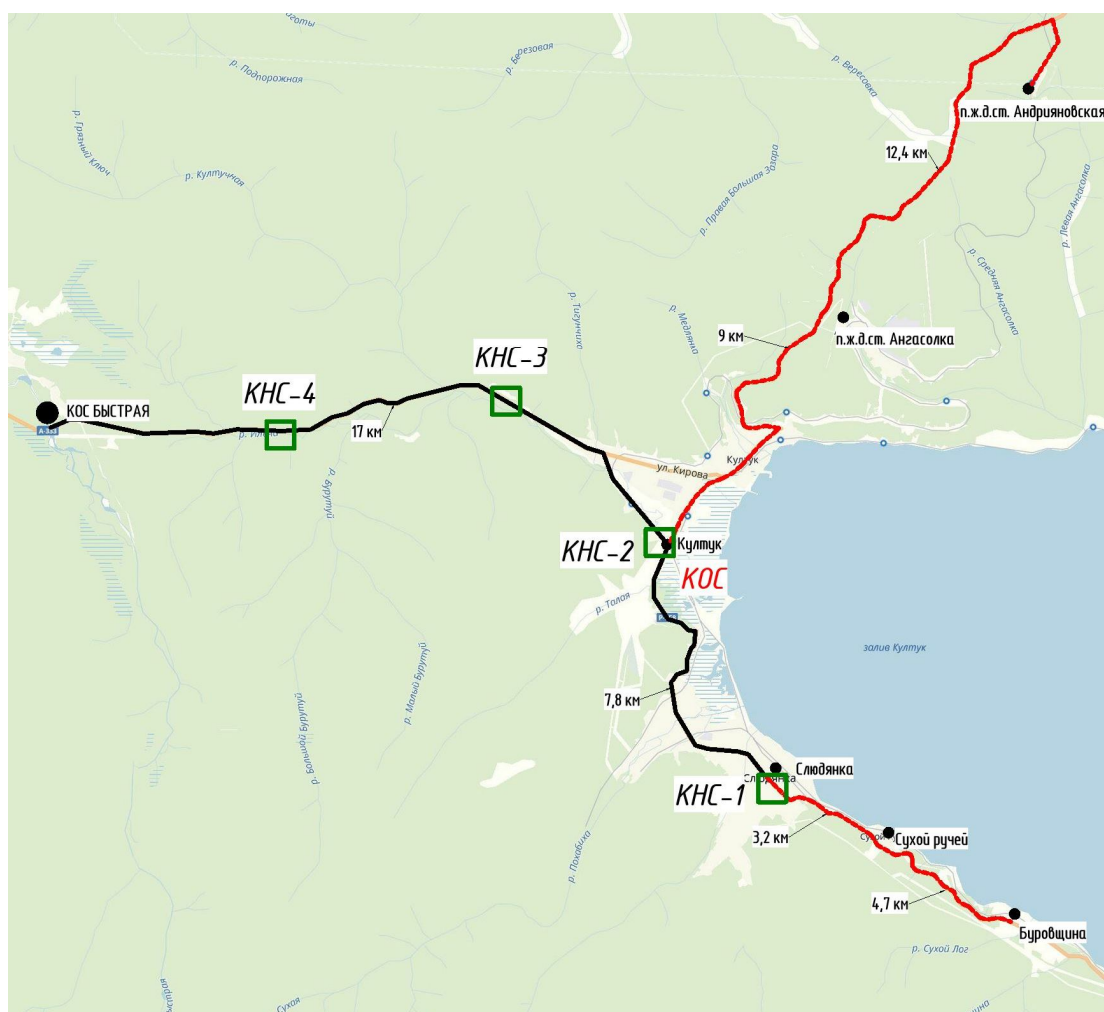


Рис. 5. Оптимальная схема водоотведения для г. Слюдянки, п. Култук, ж/д станций Андрияновская и Ангасолка

Fig. 5. Optimal water disposal scheme for the town of Slyudyanka, Kultuk, railway stations Andriyanovskaya and Angasolka

От КНС п. Култук после очистки сочные воды будут переброшены в реку Быстрая напорными трубопроводами $\varnothing 313$ мм в две нитки и тремя насосными станциями подкачки. На рис. 6 представлен оптимальный профиль этой трассы.



Рис. 6. Оптимальный профиль транспортировки сточных вод от г.Слюдянки в водораздел реки Иркут (сброс стоков в реку Быстрая)

Fig. 6. The optimal profile of transportation of succulent waters from the town of Slyudyanka to the watershed of the Irkut River (discharge of effluents into the river Bystraya)

Таблица 3

Экономические показатели оптимального варианта схемы водоотведения и очистки сточных вод Слюдянского района Иркутской области

Table 3

Economic indicators of the optimal variant of the scheme of water disposal and wastewater treatment Slyudyansky district of the Irkutsk region

Показатель	Итого по Слюдянскому району по нормам 63 приказа	Итого по Слюдянскому району по нормам рыбхоза
Капиталовложения, тыс. руб.	842 946	540 740
Эксплуатационные затраты, тыс. руб.	173 760	108 123
Приведенные затраты, тыс. руб. в год	275 698	173 011
Годовой объем сточных вод, тыс. м ³ в год	2136	2136
Суммарное расстояние, км	319,2	140
Себестоимость транспортировки и очистки 1м ³ сточных вод, руб.	129,1	81.0
Себестоимость транспортировки и очистки 1м ³ сточных вод на 1 километр, руб.	0,404	0.57

Выводы

Разработаны новая методика и методы оптимизации районных систем водоотведения, которые, в отличие от существующей методологии проектирования, позволяют определять оптимальные варианты местоположения и мощности очистных сооружений, виды транспортирования сточных вод, оптимальные трассы и оптимальную степень централизации отведения и очистки сточных вод. С помощью этой методики и методов удалось решить важнейшую задачу защиты оз. Байкал от антропогенного загрязнения. Полученный на основе расчетов по предлагаемым методам и программам вариант водоотведения не является затратным и может быть реализован за короткие сроки. Данная методика позволит в целом разработать единую систему водоотведения сточных вод с территории центральной экологической зоны оз. Байкал.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Баженов В.И., Пупырев Е.И., Самбурский Г.А., Березин С.Е. Разработка методики расчета стоимости жизненного цикла оборудования, систем и сооружений для водоснабжения и водоотведения // Водоснабжение и санитарная техника. 2018. № 2. С. 10–19.
2. Чупин Р.В. Оптимизация структуры и параметров развивающихся систем группового водоснабжения // Водоснабжение и санитарная техника. 2019. № 1. С. 30–36.
3. Пупырев Е.И. Особенности проектирования сооружений водоотведения в России на современном этапе // Водоснабжение и санитарная техника. 2014. № 3. С. 20–27.
4. Пупырев Е.И., Самбуров Г.А. Системы водоотведения в природной зоне Байкала // Экология и промышленность России. 2018. Т. 22. № 7. С. 4–10.
5. Пукемо М.М., Данилович Д.А. Недостижимые нормы для очистных сооружений озера Байкал // Экология и промышленность России. 2018. Т. 22. № 7. С. 26–32.
6. Голина Е.С., Шмалько В.М., Толстой М.Ю. Технологии очистки сточных вод в условиях Байкальской природной территории // Экология и промышленность России. 2018. Т. 22. № 7. С. 11–15.
7. Пупырев Е.И., Примин О.Г. Методическое обеспечение разработки схем централизованных систем водоснабжения и водоотведения // Водоочистка. Водоподготовка. Водоснабжение. 2013. № 5 (65). С. 4–8.
8. Чупин, Р.В. Оптимизация перспективных схем развития систем водоотведения в усло-

виях ограниченного финансирования // Водоснабжение и санитарная техника. 2018. № 2. С. 67–74.

9. Чупин Р.В., Фам Н.М., Горьков Е.А., Мороз М.В. Индикативное и адаптивное управление развитием системы водоотведения // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2018. Т. 8. № 2. С. 94–107. DOI: 10.21285/2227-2917-2018-2-94-107.

10. Чупин Р.В. Индикативное и адаптивное управление развитием систем водоотведения // Водоснабжение и санитарная техника. 2018. №№ 4,8. С. 31–37.

11. Чупин Р.В. Оптимизация структуры и параметров развивающихся систем группового водоснабжения // Р.В. // Водоснабжение и санитарная техника. 2019. № 1. С. 30–36.

12. Шевелев Ф.А. Таблицы для гидравлического расчета стальных, чугунных, асбестоцементных, пластмассовых и стеклянных водопроводных труб. Изд. 5-е, доп. Стройиздат. 1973.

13. Алексеев М.И., Ермолин Ю.А. Надежность сетей и сооружений систем водоотведения / Учебное пособие. М.: Издательство АСВ. 2015. 200 с.

14. Таха Х. Введение в исследование операций. В 2-х книгах. М.: Мир 1985. I–476 с., II–496 с.

15. Форд Л.Р., Фалкерсон Д.Р. Поток в сетях. М.: Мир. 1963. 216 с.

16. Примин О.Г., Борткевич В.С., Миркис В.И., Кантор Л.И., Винарский С.Л. О разработке схем водоснабжения городов России // Водоснабжение и санитарная техника. № 7. 2014.

REFERENCES

1. Bazhenov V.I., Pupyrev E.I., Samburskii G.A., Berezin S.E. Development of methods for calculating the cost of the life cycle of equipment, systems and facilities for water supply and sanitation. *Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika* [Water supply and sanitary engineering], 2018, no. 2, pp.10–19. (In Russ.).

2. Chupin R.V. Optimization of the structure and parameters of developing group water supply systems. *Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika* [Water supply and sanitary engineering], 2019, no. 1, pp. 30–36. (In Russ.).

3. Pupyrev E.I. Features of the design of water disposal facilities in Russia now. *Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika* [Water supply and sanitary engineering], 2014, no. 3, pp. 20–27. (In Russ.).

4. Pupyrev E.I., Samburov G.A. Drainage systems in the natural zone of Baikal. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii* [Ecology and industry of Russia], 2018, vol. 22, no.7, pp. 4–10. (In Russ.).

5. Pukemo M.M., Danilovich D.A. Unachievable standards for wastewater treatment plants of Lake Baikal. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii* [Ecology and Industry of Russia], 2018, vol. 22, no. 7, pp. 26–32. (In Russ.).

6. Gogina E.S., Shmal'ko V.M., Tolstoi M.Yu. Wastewater treatment technologies under the conditions of the Baikal natural territory. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii* [Ecology and Industry of Russia], 2018, vol. 22, no. 7, pp. 11–15. (In Russ.).

7. Pupyrev E.I., Primin O.G. Methodological support for the development of schemes for centralized systems of water supply and sanitation. *Vodoochistka. Vodopodgotovka. Vodosnabzhenie* [Water treatment. Water treatment. Water supply], 2013, no. 5 (65), pp. 4–8. (In Russ.).

8. Chupin R.V. Optimization of promising schemes for the development of water disposal systems in conditions of limited funding. *Vodos-*

nabzhenie i sanitarnaya tekhnika [Water supply and sanitary engineering], 2018, no. 2, pp. 67–74. (In Russ.).

9. Chupin R.V., Pham Ngoc Minh, Gorkov E.A., Moroz M.V. Indicative and adaptive management of wastewater system improvement. *Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost'* = Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate. 2018, vol. 8, no. 2, pp. 94–107. (In Russ.). DOI: 10.21285/2227-2917-2018-2-94-107.

10. Chupin R.V. Indicative and adaptive management of wastewater systems development. *Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika* [Water supply and sanitary engineering], 2018, no. 4, no. 8, pp. 31–37. (In Russ.).

11. Chupin R.V. Optimization of the structure and parameters of developing group water supply systems. *Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika* [Water supply and sanitary engineering], 2019, no. 1, pp. 30–36. (In Russ.).

12. Shevelev F.A. *Tablitsy dlya gidravlicheskogo rascheta stal'nykh, chugunnykh, asbestotsementnykh, plastmassovykh i steklyannykh vodoprovodnykh trub. Izdanie 5-e, dopolnennoe* [Tables for hydraulic calculation of steel, cast iron, asbestos cement, plastic and glass water pipes. 5th edition, supplemented. Stroizdat]. Stroizdat Publ., 1973.

13. Alekseev M.I., Ermolin Yu.A. *Nadezhnost' setei i sooruzhenii sistem vodootvedeniya. Uchebnoe posobie* [Reliability of networks and facilities for water disposal systems. Study Guide] Moscow: IASV Publ., 2015, 200 p.

14. Takha Kh. *Vvedenie v issledovanie operatsii. V 2-kh knigakh* [Introduction to operations research. In 2 books]. Moscow: Mir Publ., 1985, book I, 476 p., II–496 p.

15. Ford L.R. *Falkerson D.R. Potoki v setyakh* [Flows in networks]. Moscow: Mir Publ., 1963, 216 p.
16. Primin O.G., Bortkevich V.S., Mirkis V.I., Kantor L.I., Vinarskii S.L. On the development of wa-

ter supply schemes for cities in Russia. *Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika* [Water supply and sanitary engineering], 2014, no. 7. (In Russ.).

Сведения об авторах

Чупин Роман Викторович,

кандидат технических наук, старший научный сотрудник кафедры городского строительства и хозяйства, Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Российская Федерация, e-mail: ch-r-v@mail.ru

Пукемо Михаил Михайлович,

председатель совета директоров ООО «Альфа-Групп», Москва, Российская Федерация

Мелехов Евгений Сергеевич,

кандидат технических наук, доцент кафедры городского строительства и хозяйства, Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Российская Федерация, e-mail: melechov@istu.irk.ru

Чупин Виктор Романович,

доктор технических наук, профессор, зав кафедрой Городского строительства и хозяйства, Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Российская Федерация, e-mail: chupinvr@istu.edu

Information about the authors

Roman V. Chupin,

Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Department of Urban Construction and Economy, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation, e-mail: ch-r-v@mail.ru

Mikhail M. Pukemo,

Chairman of the Board of Directors of «Alfa-Group» Ltd, Moscow, Russian Federation

Evgeny S. Melekhov,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Urban Construction and Economy, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation, e-mail: melechov@istu.irk.ru

Viktor R. Chupin,

Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of Urban Construction and Economy, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation, e-mail: chupinvr@istu.edu

Критерии авторства

Чупин Р.В., Пукемо М.М., Мелехов Е.С., Чупин В.Р. имеют равные авторские права. Мелехов Е.С. несет ответственность за плагиат.

Contribution

Roman V. Chupin, Mikhail M. Pukemo, Evgeny S. Melekhov, Viktor R. Chupin have equal copyrights. Evgeny S. Melekhov is responsible for plagiarism.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this article.