Биосферная совместимость: человек, регион, технологии. 2024. № 4. С. 76–82
НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER
УДК 620.97
DOI: 10.22227/2311-1518.2024.4.76-82

ТЕПЛОВОЙ ПОТЕНЦИАЛ СТОЧНЫХ ВОД ДЛЯ ПЛАВЛЕНИЯ СНЕГА

Артём Сергеевич Невгень, Сергей Владимирович Лукин
Вологодский государственный университет (ВоГУ); г. Вологда, Российская Федерация

В условиях длительного зимнего периода и обилия твердых осадков на территории районов Российской Федерации необходимо развивать инновационные подходы к снегоудалению, которые были бы экологически безопасными и энергоэффективными. В настоящее время существует большое количество технологий, позволяющих достаточно эффективно удалять снег, выпадающий на дорожные покрытия городских автомагистралей, внутриквартальных проездов, на тротуары и придомовые территории, но для успешного решения проблем снегоудаления в городах необходим комплексный подход, при котором следует использовать не только систему промышленной переработки снега, вывозимого с территорий на снегосплавные пункты и «сухие» снегосвалки, но и малозатратные технологии, обеспечивающие утилизацию снега за счет площадок, оборудованных источниками низкопотенциального теплоснабжения. В этой связи целью изучения является исследование теплового потенциала сточных вод многоквартирного жилого дома в качестве источника низкопотенциальной энергии для плавления снега. В работе представлены результаты физико-химических исследований свежевыпавшего и расплавленного снега в г. Вологде, а также описана методика определения энергетического потенциала сточных вод многоквартирного жилого дома в качестве источника низкопотенциальной энергии. Полученные данные могут быть полезны для разработки эффективных и устойчивых систем снегоудаления в городах.

Ключевые слова: *снег, экология, энергоэффективность, утилизация снега, источники низкопотенциальной энергии, тепловой потенциал, сточные воды, физико-химические исследования проб расплавленного снега*

Для цитирования: *Невгень А.С., Лукин С.В. Тепловой потенциал сточных вод для плавления снега // Биосферная совместимость: человек, регион, технологии. 2024. № 4. С. 76–82. DOI: 10.22227/2311-1518.2024.4.76-82*

THERMAL POTENTIAL OF WASTEWATER FOR MELTING SNOW

Artyom S. Nevgen, Sergey V. Lukin
Vologda State University (VSU); Vologda, Russian Federation

In conditions of a long winter period and an abundance of solid precipitation in the regions of the Russian Federation, it is necessary to develop innovative approaches to snow removal that would be environmentally safe and energy efficient. Currently, there are a large number of technologies that make it possible to effectively remove snow falling on the road surfaces of urban highways, driveways, sidewalks and adjacent territories, but to successfully solve the problems of snow removal in cities, an integrated approach is needed, in which not only a system of industrial processing of snow exported from territories to snow-melting points and "dry" snow dumpers, but also low-cost technologies that ensure the disposal of snow at the expense of sites, equipped with low-potential heat supply sources In this regard, the purpose of the study is to study the thermal potential of wastewater from an apartment building as a source of low-potential energy for melting snow. The paper presents the results of physico-chemical studies of freshly fallen and melted snow in Vologda, and also describes a method for determining the energy potential of wastewater from an apartment building as a source of low-potential energy. The data obtained can be useful for the development of efficient and sustainable snow removal systems in cities.

Keywords: *snow, ecology, energy efficiency, snow utilization, low-potential energy sources, thermal potential, wastewater, physico-chemical studies of molten snow samples*

For citation: *Nevgen A.S., Lukin S.V. Thermal potential of wastewater for melting snow. Biosphere Compatibility: Man, Region, Technology. 2024; 4:76-82. DOI: 10.22227/2311-1518.2024.4.76-82 (rus.).*

Введение

В условиях длительного зимнего периода и обилия твердых осадков на территории районов Российской Федерации необходимо развивать инновационные подходы к снегоудалению, которые были бы экологически безопасными и энергоэффективными.

В настоящее время существует большое количество технологий, позволяющих достаточно эффективно удалять снег, выпадающий на дорожные покрытия городских автомагистралей, внутриквартальных проездов, на тротуары и придомовые территории [1], но для успешного решения проблем снегоудаления в городах необходим комплексный подход, при котором следует использовать не только

 © А.С. Невгень, С.В. Лукин, 2024

систему промышленной переработки снега, вывозимого с территорий на снегосплавные пункты и «сухие» снегосвалки, но и малозатратные технологии, обеспечивающие утилизацию снега за счет площадок, оборудованных источниками низкопотенциального теплоснабжения.

На данный момент на территории города Вологды снег, который собирается с улиц, площадей и дорог, не подвергается очистке, а вывозится на загородные полигоны либо непосредственно скапливается на территории города. Такой подход к утилизации снега, при котором отсутствует должная очистка и переработка, не только увеличивает нагрузку на городскую инфраструктуру, но и приводит к значительному негативному воздействию на окружающую среду.

Для изучения влияния снежного покрова на окружающую среду в зимний период были отобраны пробы свежевыпавшего снега и пробы снега перед началом снеготаяния, отбор проб осуществлялся в центральной части города Вологды. Расположение точек пробоотбора выбиралось на основе функционального зонирования города (рис. 1). Результаты физико-химических исследований объединенных проб расплавленного снега представлены в таблице.

Результаты показали, что пробы расплавленного снега из центральной части города содержат уровни загрязняющих веществ, превышающих установленные нормативы[1] по следующим показателям: $БПК_5$, аммиак, взвешенные вещества, нефтепродукты, общее железо, медь, алюминий и фенолы. Исследования свежевыпавшего снега показывают, что расплавленный снег удовлетворяет требованиям сброса в горколлектор системы водоотведения города Вологды по нормативам, принятым в Постановлении[2].

В период снеготаяния происходит увеличение количества талого стока, который содержит различные загрязнения, такие как нефтепродукты, крупнодисперсный мусор и медленно оседающие вещества [2–4]. Чтобы оценить степень воздействия снежного покрова на водный объект во время весеннего снеготаяния, были отобраны пробы речной воды в восьми точках реки Содемы. Река Содема (Золотуха) протекает через центральную часть города Вологда и, согласно данным государственного водного реестра России, относится к Двинско-Печорскому бассейновому округу, входя в речной бассейн реки Северная

[1] Об установлении нормативов состава сточных вод для абонентов централизованной системы водоотведения муниципального образования «Город Вологда» : Постановление Администрации г. Вологды от 21 августа 2020 г. № 1069.

[2] Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения : Приказ Минсельхоза России от 13 декабря 2016 года № 552.

Рис. 1. Картосхема города с расположением точек пробоотбора

Результаты физико-химических исследований проб расплавленного снега с центральной части города Вологды

Показатель	Единицы измерения	Условия приема в городскую канализацию	ПДК сброса в водоприемник	Объединенная проба «Центр»	Объединенная проба «Центр. Свежевыпавший снег»
$БПК_5$	мг/дм³	200	3	6,3	2,6
Аммоний-ион	мг/дм³	25,1	0,5	0,7	0,32
Взвешенные вещества	мг/дм³	231,5	10	> 5000 (4706,2)	26
Нефтепродукты	мг/дм³	0,94	0,05	1,63	0,07
Железо общее	мг/дм³	0,66	0,1	0,5	0,045
Сульфат-ион	мг/дм³	100	100	< 50 (6)	< 50 (1)
АПАВ	мг/дм³	0,559	0,5	0,03	< 0,025
Медь	мг/дм³	0,012	0,001	0,013	0,0004
Кадмий	мг/дм³	0,1	0,1	< 0,0003	< 0,0003
Свинец	мг/дм³	0,1	0,1	0,0064	< 0,0003
Цинк	мг/дм³	0,021	0,01	0,0045	0,016
Алюминий	мг/дм³	1	0,04	0,22	< 0,02
Фенолы	мг/дм³	0,015	0,001	0,006	< 0,0005

Двина [5]. Будучи водным объектом рыбохозяйственного значения первой категории, оценка состояния речных вод осуществлялась путем сравнения полученных значений качества воды по взвешенным веществам и нефтепродуктам с нормативами ПДК для рыбохозяйственного водопользования[1]. На рис. 2 представлены результаты исследований качества воды реки Содема, основанные на анализе проб, взятых в восьми контрольных точках, обозначенных на карте города. Диаграммы на рисунке визуализируют концентрации взвешенных веществ и нефтепродуктов в каждом из пунктов отбора.

Анализ данных, представленных на рис. 2, показывает, что по мере удаления от истока (цифра 1) реки наблюдается увеличение содержания взвешенных частиц и нефтепродуктов. Данное явление связано с ростом антропогенной нагрузки в водосборном бассейне реки в периоды активного снеготаяния.

В связи с необходимостью минимизации негативного воздействия на окружающую среду и повышения энергоэффективности процессов снегоудаления разработка систем утилизации снежного покрова с использованием низкопотенциальных источников тепла становится актуальной задачей.

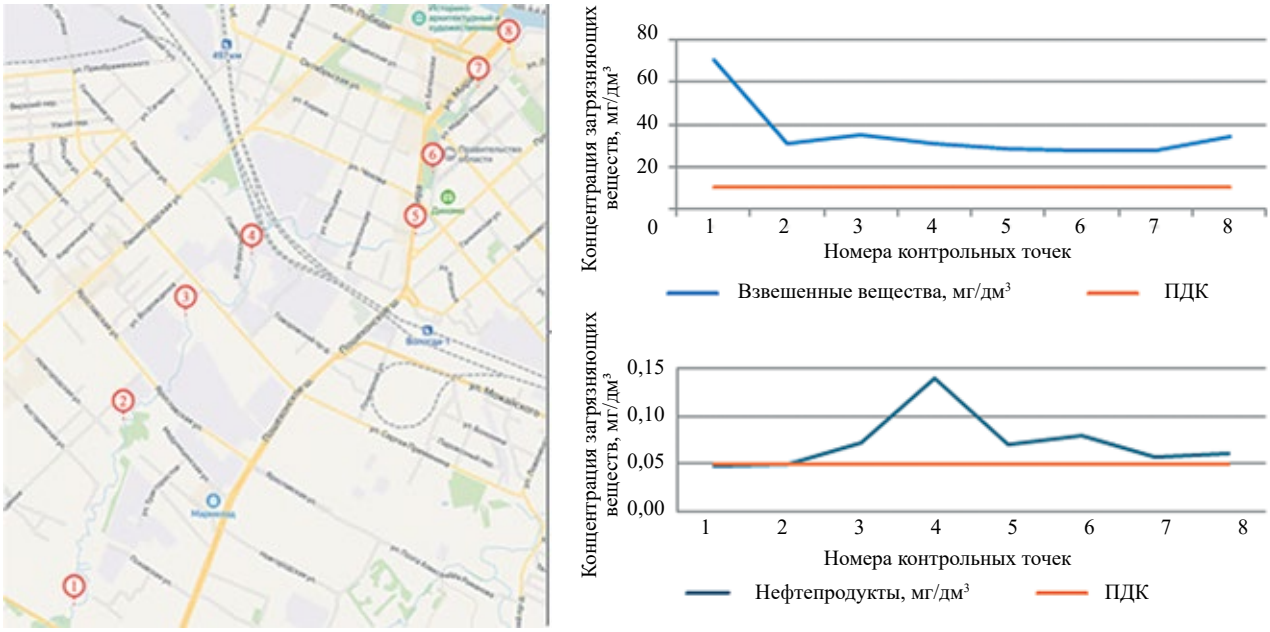

Рис. 2. Результаты исследований качества воды реки Содема по взвешенным веществам и нефтепродуктам

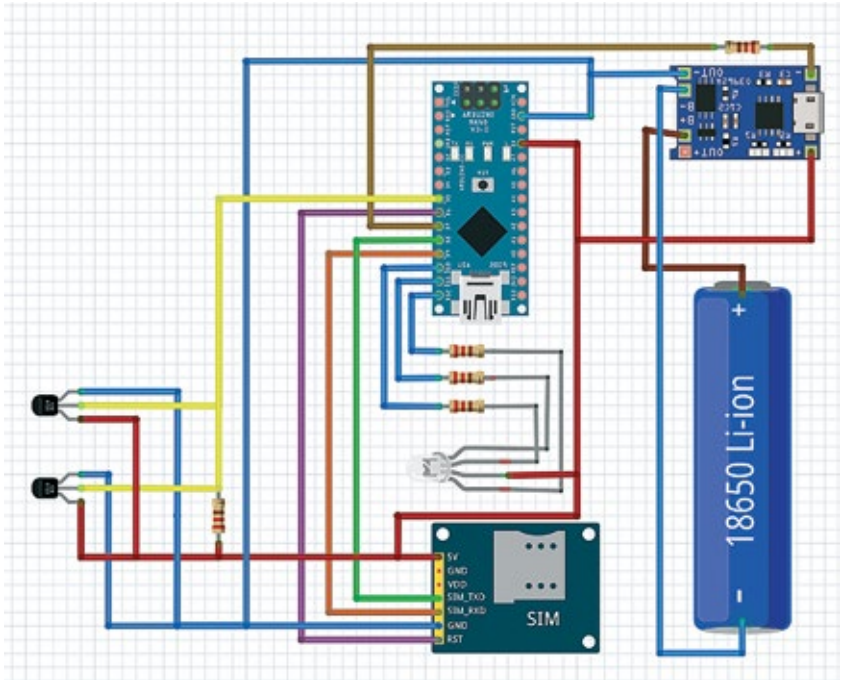

Рис. 3. Схема устройства для измерения температуры на основе платформы Arduino Nano

Целью данного исследования является исследование теплового потенциала сточных вод многоквартирного жилого дома в качестве источника низкопотенциальной энергии для плавления снега.

Материалы и методы

Сточные воды редко используют как источник низкопотенциальной энергии. Для определения энергетического потенциала сточных вод необходимо знать расход водоотведения, а также температуру сточной воды. Расход водоотведения принимается равным расходу водопотребления на исследуемом объекте[3]. Объектом наблюдения в исследовании являлся жилой многоквартирный дом, расположенный в г. Вологде.

В этом исследовании данные температуры сточных вод определялись при помощи водонепроницаемых датчиков температуры DS18B20, установленных в систему канализации жилого дома перед выпуском сточных вод в наружную канализационную систему. Водонепроницаемый датчик DS18B20 работает в диапазоне температур от –55 (218,15 К) до +125 °С (398,15 К). При температуре от –10 до 85 °С имеет точность 0,0625 °С [6]. Датчики температуры подключены к Arduino с модулем GSM на чипе SIM800L. Точкой установки датчиков температуры служил канализационный трубопровод перед выпуском сточных вод в наружную канализационную систему. На рис. 3 представлена схема устройства для определения температуры. Устройство состоит из вычислительной платформы Arduino Nano v3 ATmega328P, GSM модуля SIM800L, контроллера заряда-разряда для Li-ion аккумулятора TP4065 и датчиков температур DS18B20. Калибровка устройства осуществлялась при помощи поверенного контактным термометром Техно-Ас ТК 5.01 МС с погружаемым зондом.

Результаты и их обсуждение

Результаты суточного мониторинга динамики водопотребления и температуры сточных вод исследуемого объекта представлены на рис. 4, 5.

Температура сточных вод из многоквартирного жилого здания, отображенная на рис. 4, демонстрирует значения в диапазоне от 9,6 (282,75 К) до 24,6 °С (297,75 К) в течение исследуемого периода, не опускаясь при этом ниже точки замерзания, а средняя температура сточных вод за рассматриваемый период составляет 18,5 °С (291,65 К), что указывает на возможность использования сточных вод в качестве источника низкопотенциальной энергии.

Согласно графику (рис. 5), периоды с 6:00 до 9:00 и с 18:00 до 22:00 характеризуются максимальной часовой нагрузкой, причем в эти интервалы времени достигается максимальный часовой расход сточных вод (G = 1200 кг/ч).

Сравнивая суточные изменения температуры сточных вод (рис. 4) с диаграммой расхода водопотребления (рис. 5), наблюдается синхронность

[3] СП 32.13330.2018. Свод правил. Канализация. Наружные сети и сооружения. Актуализированная редакция СНиП 2.04.03–85 : утв. приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 25.12.2018 № 860/пр. (дата введения: 26.06.2019). М. : Стандартинформ, 2019. 76 с.

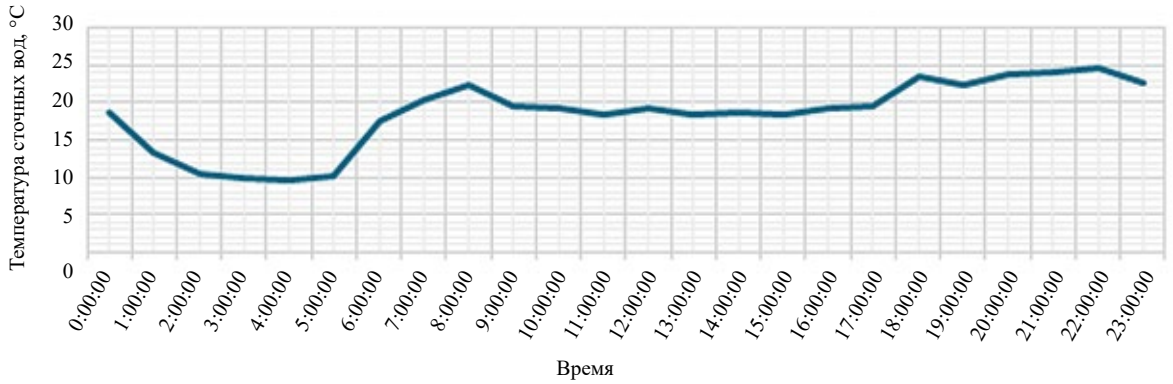

Рис. 4. Суточные изменения температуры сточных вод, °С

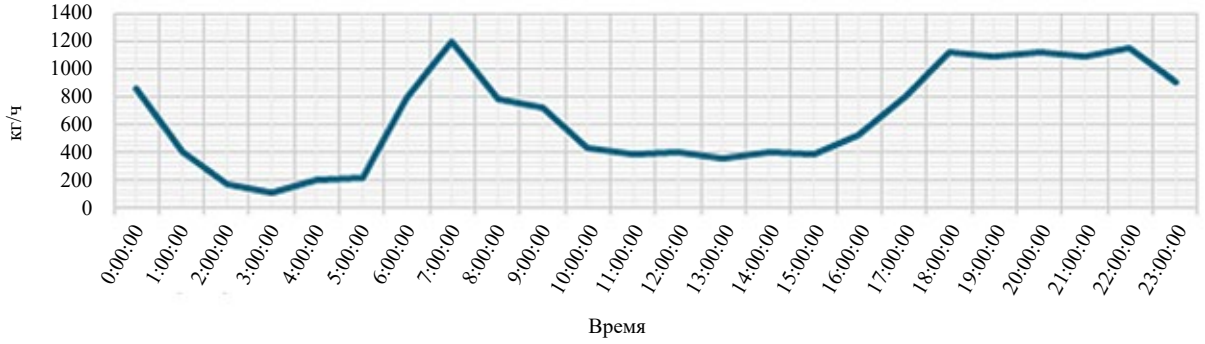

Рис. 5. Суточные изменения водопотребления, кг/ч

в поведении этих двух параметров, а также совпадение максимального водопотребления с температурным максимумом. Данное наблюдение указывает на потенциал согласованного использования данных параметров для эффективного управления и оптимизации энергетических процессов.

Определим тепловой потенциал Q — количество теплоты, которое можно получить при извлечении низкопотенциального тепла из стоков, определяющееся по формуле [7]:

$$Q = G \cdot \Delta T \cdot c, \qquad (1)$$

где Q — количество теплоты, кДж/ч; G — количество стоков, кг/ч; ΔT — допустимое изменение температуры сточных вод, °С; c — теплоемкость воды, c = 4,18 кДж/(кг·К).

Допустимое изменение температуры сточных вод Δt принимаем как разность температуры стоков на выходе из многоквартирного дома и минимальной температуры сбрасываемых стоков (5 °С (278,15 К)).

Тогда тепловой потенциал исследуемого объекта будет равен:

$$Q_{max} = 98\ 314 \text{ кДж/ч} = 0{,}0234 \text{ Гкал/ч};$$

$$Q_{ср.знач} = 36\ 634 \text{ кДж/ч} = 0{,}009 \text{ Гкал/ч};$$

$$Q_{min} = 1923 \text{ кДж/ч} = 0{,}00046 \text{ Гкал/ч}.$$

Полученные результаты показывают, что тепловой потенциал, который можно получить при извлечении низкопотенциального тепла из стоков многоквартирного дома, может варьироваться в пределах от 1923 до 98 314 кДж/ч в зависимости от расхода стоков и температурного режима. Таким образом, использование теплового потенциала сточных вод представляет собой перспективное направление для эффективного использования энергии и снижения негативного воздействия на окружающую среду.

Определим количество тепла, требуемого для таяния снежного покрова на площади 1 м^2. Количество тепла, которое необходимо для плавления снега, определяется его теплоемкостью и теплотой плавления [8]. Количество тепла на разогрев снега до температуры 0 °С (273,15 К):

$$Q_1 = c_p \cdot m \cdot (273{,}15 - T_{сн}), \qquad (2)$$

где c_p — теплоемкость снега, c = 2,1 кДж/(кг·К); m — масса снега; $T_{сн}$ — температура снега.

Количество тепла на плавление снега равно:

$$Q_2 = q_{пл} \cdot m, \qquad (3)$$

где $q_{пл}$ — теплота плавления снега, равна 330 кДж/кг.

Суммарная тепловая мощность для плавления снежного покрова:

$$Q_{сп} = Q_1 + Q_2 = m(c_p \cdot (273{,}15 - T_{сн}) + q_{пл}). \qquad (4)$$

Для поддержания поверхности полностью чистой в максимально возможный снегопад (без учета заноса), принимая суточное количество снега 199 мм [9–11]. Плотность свежевыпавшего снега принимаем 200 кг/м^3. Расчетная температура окружающего воздуха принималась равной минус 8 °С[4].

Для расчета количества снега (m), выпадающего на 1 м^2 в час, найдем количество снега, выпадающего за час:

199 мм снега за сутки = 199/24 мм снега за час ≈ 8,29 мм снега за час.

Далее переведем это количество в кг/м^2 в час, учитывая плотность снега:

8,29 мм снега за час · 0,2 кг/литр (200 кг/м^3 = = 0,2 кг/литр) = 1,658 кг/м^2 в час.

Следовательно, среднее количество снега, выпадающего на 1 м^2 площади за час, составляет 1,658 кг/ч.

Количество тепла, требуемого для плавления снега, будет равно:

$$Q_{сп} = 1407 \text{ кДж/ч} = 0{,}0003 \text{ Гкал/ч}.$$

Исходя из проведенных расчетов, можно утверждать, что использование теплового потенциала сточных вод для таяния снега является эффективным способом экономии энергии. Полученное значение теплового потенциала сточных вод значительно превышает количество тепла, необходимого для таяния снежного покрова.

[4] СП 131.13330.2020. Свод правил. «Строительная климатология». Актуализированная редакция СНиП 23-01.99*.

Выводы

Проведенное исследование подтвердило целесообразность использования теплового потенциала сточных вод многоквартирного жилого дома для повышения энергоэффективности городских систем снегоудаления. Температурный мониторинг сточных вод продемонстрировал, что их средняя температура составляет 18,5 °С, что обеспечивает возможность использования этих ресурсов в качестве источника низкопотенциальной энергии. Расчеты теплового потенциала показали, что выделяемое количество теплоты значительно превышает потребности для плавления снежного покрова, подтверждая высокую эффективность предложенного подхода.

Результаты анализа качества воды и талого стока в городе Вологде выявили экологические аспекты, требующие внимания. Пробы расплавленного снега из центральных районов города продемонстрировали превышение предельно допустимых концентраций загрязняющих веществ, включая нефтепродукты, взвешенные вещества, металлы и органические соединения. В то же время свежевыпавший снег соответствует нормативам, установленным для сброса в городскую канализационную систему, что подчеркивает важность управления процессами снеготаяния в соответствии с требованиями охраны окружающей среды.

Таким образом, использование теплового потенциала сточных вод представляет собой не только энергосберегающее решение, но и инструмент для улучшения экологической обстановки в городах.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Ухин Д.В.* Утилизация снежно-ледяных масс с дорожных покрытий с использованием низкопотенциальных источников теплоты : дис. … канд. техн. наук. Воронеж, 2010. 138 с.
2. *Невгень А.С.* Исследование седиментационных свойств талого стока с водосбора реки Содемы : мат. Междунар. науч. конф., в 3-х т. Вологда : Вологодский государственный университет, 2022. Т. 1. С. 300–302.
3. *Невгень А.С.* Оценка влияния водосборной территории на формирование качества водного объекта : мат. Всеросс. науч. конф., в 3-х т. Вологда : Вологодский государственный университет, 2023. Т. 1. С. 408–412.
4. *Байков В.Н., Фомин А.А., Эм И.Ю.* Оценка загрязненности снегового покрова и его влияние на поверхностный сток с территории Москвы // Проекты развития инфраструктуры города. Вып. 3: Водные системы и благоустройство городской среды : сб. научн. тр. М. : Прима-Пресс-Москва, 2003. С. 164–169.
5. *Яковлев С.В.* Канализация : учебник для вузов. 5-е изд. перераб. и доп. М. : Стройиздат, 1975. 632 с.
6. *Koestoer R.A., Saleh Y.A., Roihan I., Harinaldi H.* A simple method for calibration of temperature sensor DS18B20 waterproof in oil bath based on Arduino data acquisition system // AIP Conference Proceedings. 2019. No. 2062 (1). P. 020006. DOI: 10.1063/1.5086553
7. *Рей Д., Макмайкл Д.* Тепловые насосы. М. : Энергоиздат, 1982. 224 с.
8. *Струпинский М.Л., Хренков Н.Н.* Расчет мощности противообледенительных систем для открытых площадей // Промышленный электрообогрев и электроотопление. 2013. № 1. С. 36–38. EDN RZPPFH.
9. *Голубев В.Н., Семенов В.А., Фролов Д.М.* Вариации водозапаса снежного покрова и интенсивности его таяния как фактор весеннего половодья на реках России // Динамика и термика рек, водохранилищ и прибрежной зоны морей : мат. VII Междунар. науч.-практ. конф. М. : РУДН, 2014. С. 24–27.

10. *Фролов Д.М.* Влияние интенсивности снегопадов и строения и структуры снежной толщи на водотоках и ее теплопроводности и интенсивности намерзания льда и вероятности заторов на этих водотоках : Труды VII Междунар. науч.-практ. конф. М. : ООО «ПолиПРЕСС», 2019. Т. I (IV). С. 229–238.
11. *Булавина Е.В.* Применение региональных метеорологических рядов наблюдений при проектировании схем утилизации снега на территории города Вологды // Геология в развивающемся мире : сб. науч. тр. (по мат. X Междунар. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых), в 2-х т. / отв. ред. Р.Р. Гильмутдинов. Пермь : Пермский государственный национальный исследовательский университет, 2017. Т. 2. С. 252–253. EDN YJUZCL.

Об авторах: **Артём Сергеевич Невгень** — аспирант; **Вологодский государственный университет (ВоГУ)**; 160000, г. Вологда, ул. Ленина, д. 15; e-mail: nac6@list.ru;

Сергей Владимирович Лукин — д-р технических наук, профессор кафедры теплогазоводоснабжения; **Вологодский государственный университет (ВоГУ)**; 160000, г. Вологда, ул. Ленина, д. 15; e-mail: s.v.luk@yandex.ru.

REFERENCES

1. Ukhin D.V. *Utilization of snow and ice masses from road surfaces using low-potential heat sources : dissertation for the degree of Candidate of technical Sciences*. Voronezh, 2010; 138. (rus.).
2. Nevgen A.S. *Investigation of sedimentation properties of* mel.ru*noff from the Sodema river catchment : Proceedings of the International Scientific Conference, in 3 volumes.*Vologda, 2022; 1:300-302. (rus.).
3. Nevgen A.S. *Assessment of the influence of the catchment area on the formation of the quality of a water body : Materials of the All-Russian Scientific conference, in 3 volumes*.Vologda, 2023; 1:408-412. (rus.).
4. Baykov V.N., Fomin A.A., Em I.Yu. Assessment of snow cover pollution and its impact on surfac.runoff from the territory of Moscow. *Projects for the development of urban infrastructure. Issue 3: Water systems and urban improvement : collection of scientific papers*. Moscow, Prima-Press-Moscow, 2003; 164-169. (rus.).
5. Yakovlev S.V. *Sewerage* : *textbook for universities*. *5th ed. and an additional one*. Moscow, Stroyizdat, 1975; 632. (rus.).
6. Koestoer R.A., Saleh Y.A., Roihan I., Harinaldi H. A simple method for calibration of temperature sensor DS18B20 waterproof in oil bath based on Arduino data acquisition system. *AIP Conference Proceedings.* 2019; 2062(1):020006. DOI: 10.1063/1.5086553
7. Ray D., McMichael D. *Heat pumps*. Moscow, Energoizdat Publ., 1982; 224.
8. Strupinsky M.L., Khrenkov N.N. Calculation of the power of de-icing systems for open areas. *Industrial electric heating and electric heating*. 2013; 1:36-38. EDN RZPPFH.
9. Golubev V.N., Semenov V.A., Frolov D.M. Variations in the water reserve of snow cover and the intensity of its melting as a factor of spring flooding on the rivers of Russia. *Dynamics and thermology of rivers, reservoirs and the coastal zone of the seas : materials of the VII International Scientific and Practical Conference*. Moscow, RUDN, 2014; 24-27. (rus.).
10. Frolov D.M. *The influence of snowfall intensity and the structure and structure of the snow column on watercourses on its thermal conductivity and the intensity of ice freezing and the likelihood of congestion in these watercourses* : *Proceedings of the VII International Scientific and Practical Conference*. Moscow, LLC “PoliPRESS”, 2019; I(IV):229-238. (rus.).
11. Bulavina E.V. Application of regional meteorological series of observations in the design of snow disposal schemes in the city of Vologda. *Geology in the developing world : a collection of scientific papers (based on the materials of the X International Scientific and Practical Conference of Students, postgraduates and Young Scientists*), *in 2 volumes* / ed. R.R. Gilmutdinov. Perm, Perm State National Research University, 2017; 2:252-253. EDN YJUZCL. (rus.).

About the authors: **Artyom S. Nevgen** — Graduate student; **Vologda State University (VSU)**; 15 Lenin st., Vologda, 160000, Russian Federation; e-mail: nac6@list.ru;

Sergey V. Lukin — Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Heat and Gas Supply; **Vologda State University (VSU)**; 15 Lenin st., Vologda, 160000, Russian Federation; e-mail: s.v.luk@yandex.ru.