

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-3-248-258>

УДК 697.343

Исследование теплообмена в продуваемых непроходных каналах теплотрасс

Часть 2

Докт. техн. наук, проф. В. А. Седнин¹⁾, магистр техн. наук Т. В. Бубырь¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2021
Belarusian National Technical University, 2021

Реферат. Для повышения эффективности эксплуатации тепловых сетей, размещенных в непроходных каналах, ранее предложено схемно-структурное решение регенеративно-утилизационного теплоиспользования в системах централизованного теплоснабжения. Невозможность создания натурной экспериментальной установки, охватывающей нужный диапазон факторов и область их изменения, сложность проведения пассивного эксперимента на существующих теплотрассах привели к необходимости разработки виртуальной модели на базе программного комплекса ANSYS. На этой виртуальной модели проведен шестифакторный эксперимент. Получены уравнения регрессии для определения напора, требуемого для обеспечения продувки канала воздухом, а также теплообмена с трубопроводами прямой и обратной сетевой воды, расположенными в канале, и теплообмена с грунтом вокруг канала. Кроме того, выведена регрессионная зависимость для нахождения интегрального потока теплоты от перечисленных омываемых поверхностей к потоку воздуха. Осуществлен переход от безразмерных факторов к натуральным. С помощью карт Парето определены наиболее значимые факторы. В части 1 статьи проведена верификация полученных зависимостей. С использованием стандартных статистических методов оценок на базе рассчитанных значений критериев Фишера, Стьюдента и других определена адекватность уравнений регрессии. Приведены и проанализированы поверхности отклика с помощью двумерных сечений для ряда факторов при фиксированных значениях одних и изменении двух наиболее характерных, физически весомых для данной функции отклика. На базе анализа регрессионных зависимостей выполнена их валидация. Полученные регрессионные уравнения охватывают практически весь спектр возможных диаметров теплотрасс, что позволяет использовать их при разработке энергосберегающих проектов.

Ключевые слова: теплоснабжение, непроходные каналы, теплотрасса, теплообмен, аэродинамическое сопротивление канала, использование теплоты грунта, уравнение регрессии, шестифакторный эксперимент

Для цитирования: Седнин, В. А. Исследование сложного теплообмена в продуваемых непроходных каналах теплотрасс. Часть 2 / В. А. Седнин, Т. В. Бубырь // *Наука и техника*. 2021. Т. 20, № 3. С. 248–258. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-3-248-258>

Heat Transfer Research in Blown-Through Non-Passable Heating Mains Channels

Part 2

V. A. Sednin¹⁾, T. V. Bubyr¹⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. A schematic and structural solution of regenerative-utilization heat use in centralized heat supply systems was previously proposed in order to increase the efficiency of operation of heating networks located in non-passable channels. The impossibility of creating a full-scale experimental setup covering the required range of factors and the area of their change, the complexity of a passive experiment on existing heating mains led to the need to develop a virtual model based

Адрес для переписки

Седнин Владимир Александрович
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65/2,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 293-92-16
pte@bntu.by

Address for correspondence

Sednin Vladimir A.
Belarusian National Technical University
65/2, Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 293-92-16
pte@bntu.by

on the ANSYS software package. A six-factor experiment has been carried out on this virtual model. Regression equations have been obtained to determine the pressure required to provide air purging of the channel, as well as heat exchange with pipelines of direct and return network water located in the channel, and heat exchange with soil around the channel. In addition, a regression relationship has been derived to find the integral heat flux from the listed washed surfaces to the air flow. The transition from dimensionless to natural factors has been made in the paper. The most significant factors are identified with the help of Pareto cards. The obtained dependencies have been verified in Part 1 of the paper. The adequacy of the obtained regression equations has been determined using standard statistical estimation methods based on the calculated values of the Fisher's, Student's and other criteria. The response surfaces are presented and analyzed using two dimensional sections for a number of factor values at fixed values of one and a change in two most characteristic, physically significant for a given response function. They have been validated on the basis of the analysis of regression dependencies. The obtained regression equations cover almost the entire range of possible diameters of heating mains, which makes it possible to use them in the development of energy-saving projects.

Keywords: heat supply, non-passable channels, heating main, heat exchange, duct aerodynamic drag, use of soil heat, regression equation, six factor experiment

For citation: Sednin V. A., Bubyр T. V. (2021) Heat Transfer Research in Blown-Through Non-Passable Heating Mains Channels. Part 2. *Science and Technique*. 20 (3), 248–258. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-3-248-258> (in Russian)

Введение

Ранее авторами показана целесообразность схемно-структурного решения утилизации теплоты, рассеиваемой трубопроводами тепло-трасс, размещенными в непроходных каналах, с одновременным использованием теплоты грунта вокруг каналов [1, 2]. В части 1 данной статьи описана реализация шестифакторного эксперимента, получены уравнения регрессии для определения напора, требуемого для обеспечения протекания воздуха, а также теплообмена с трубопроводами прямой сетевой воды (ПСВ) и обратной сетевой воды (ОСВ), расположен-

ными в канале, и теплообмена с грунтом вокруг канала. Кроме того, выведена регрессионная зависимость для нахождения интегрального потока теплоты от перечисленных омываемых поверхностей к потоку воздуха. Проведены проверка на адекватность регрессионных соотношений и их верификация.

В общем виде уравнение для поверхности отклика второго порядка представлено в части 1 статьи, там же проведена верификация соответствующих регрессионных уравнений. Значения размерных коэффициентов этих уравнений приведены в табл. 1.

Таблица 1

Значения коэффициентов в уравнениях регрессии
Coefficient values in regression equations

Коэффициент уравнения регрессии	Функция отклика для расчета				
	Мощность удельного теплового потока, Вт/м ²				Удельные потери напора на участке Y_5 , Па/м
	Суммарный поток $q_{взд}$	от ПСВ $q_{ПСВ}$	от ОСВ $q_{ОСВ}$	от грунта $q_{гр}$	
1	2	3	4	5	6
δ_0	64	2,090000	0,83	7,2	-0,164000
δ_1	-0,239000	0,115000	0,0546	-0,178000	0,000296
δ_2	0,002160	-0,000268	-0,0002	0,000682	1,96E-06
δ_3	-103	12,700000	10,6	-14,800000	0,307000
δ_4	154	-0,319000	-5,58	81	2,480000
δ_5	-0,565000	0,500000	0,508	5,320000	0,126000
δ_6	-0,141000	-0,044100	-0,0425	-0,394000	0,004760
δ_7	-0,710000	0,088000	0,095	-0,313000	-0,001920
δ_8	0,004870	0,001250	-3,73E-06	0,001500	1,05E-05
δ_9	-1,490000	-0,159000	-0,217	-2,970000	-0,000290
δ_{10}	0,0134000	0,002130	0,00084	0,006100	3,69E-05
δ_{11}	0,065000	-0,479000	-0,237	2,060000	-0,004590
δ_{12}	0,168000	0,027100	0,0109	0,045000	0,000291
δ_{13}	-0,295000	-0,246000	-0,129	0,234000	-0,001130
δ_{14}	0,019300	0,000586	0,00062	0,005300	-7,5E-05
δ_{15}	-0,000450	-0,000402	-9,3E-05	-6,4E-05	-7,5E-08
δ_{16}	0,005380	0,000288	0,000355	0,002530	1,7E-07
δ_{17}	-0,005710	-0,000160	-0,00026	-0,002690	-5,3E-07

1	2	3	4	5	6
δ_{18}	3,220000	0,000550	-0,084	-4,060000	-0,457000
δ_{19}	0,125000	0,138000	0,061	0,036800	-7,9E-05
δ_{20}	0,164000	-0,270000	-0,226	3,550000	0,005080
δ_{21}	-0,595000	0,070000	0,072	-3,570000	-0,000400
δ_{22}	0,002800	0,001270	0,000465	0,000384	1,6E-06
δ_{23}	-0,087000	-0,001970	-0,002250	-0,087000	-0,00022
δ_{24}	0,086000	0,000940	0,001660	0,090000	1,52E-05
δ_{25}	0,000810	-0,000310	-1,8E-05	-0,000240	1,9E-07
δ_{26}	-0,011100	0,000505	0,000572	0,003570	3,96E-06
δ_{27}	-0,001790	-0,000240	-6,5E-05	-0,00212	1,85E-06

Анализ регрессионных зависимостей

Полученные регрессионные зависимости охватывают практически весь диапазон геометрий непроходных каналов и наружных диаметров теплотрасс, что позволяет непосредственно применять их в практических расчетах. В этом случае отпадает необходимость разработки критериальных зависимостей для обобщения результатов экспериментального исследования с целью распространения их на теплотрассы иных характерных размеров поперечных сечений. Это определяет дальнейший анализ регрессионных соотношений с целью их валидации. Для решения данной задачи удобно прибегнуть к построению двумерных сечений гиперповерхностей, соответствующих полученным уравнениям регрессии, фиксируя сечения на заданных значениях тех или иных факторов [3–11].

Прежде всего, следует понять, о каких значениях потерь напора воздушного потока и

длинах участков теплотрасс для организации утилизации различных тепловых потоков может идти речь, какие тягодутьевые устройства потребуются для организации протока воздуха через тот или иной участок непроходного канала теплотрасс. На рис. 1 показано изменение потерь напора при изменении сечения канала и скорости продуваемого воздуха.

Сечение каналов теплотрасс практически не влияет на потери напора при скоростях потока воздуха до 6 м/с и лишь при превышении этой скорости отмечается влияние поперечных размеров канала на потери напора. Во всех случаях не следует осуществлять продувку со скоростями воздуха более 8 м/с. При использовании вентиляторов и дымососов, характеризующихся создаваемым напором до 3–4 кПа, длина продуваемого участка канала может достигать нескольких километров. И это уже отвечает реальной ситуации расположения приточного и вытяжного сечений потока воздуха в канале.

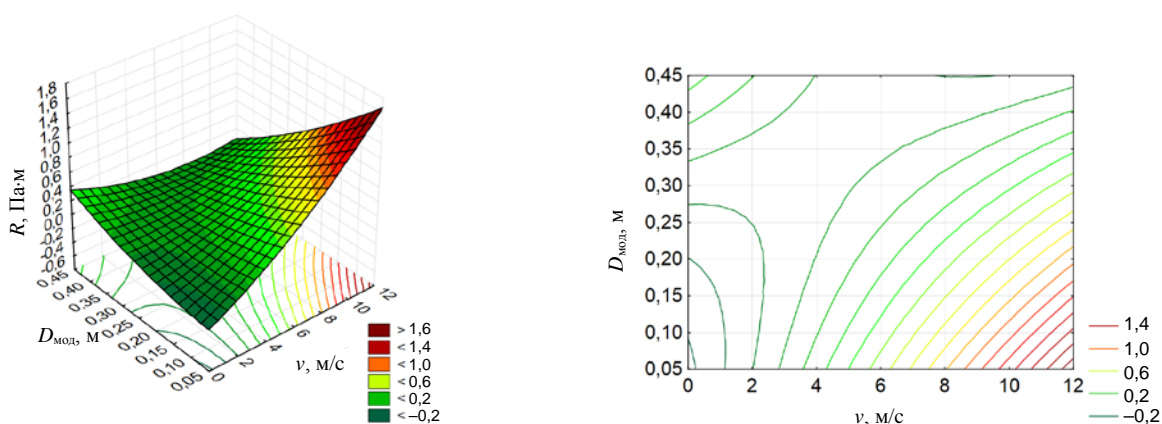


Рис. 1. Двумерные сечения гиперповерхности, описывающей потери удельного напора R при продувке с разной скоростью потока воздуха для каналов различных поперечных размеров при постоянных оставшихся четырех факторах на нулевых значениях плана

Fig. 1. Two-dimensional sections of hypersurface describing specific head loss R when blowing with different air flow rates for ducts of different transverse dimensions with constant remaining four factors at zero values of plan

Интегральный поток теплоты, который в ходе продувки канала может быть подведен к воздуху для дальнейшей утилизации, определяется с помощью уравнения регрессии, описывающего мощность удельного теплового потока, сечения гиперповерхности которого приведены на рис. 2–4. Согласно анализу карты Парето, наиболее влияющими факторами на интегральный тепловой поток к воздуху от всех омываемых поверхностей канала являются температура воздуха в начале участка, скорость потока воздуха в канале и температура грунта вокруг канала. Рассмотрим сечения соответ-

ствующих гиперповерхностей в зависимости от указанных факторов.

Отсекая части сечения, где скорость воздуха превышает установленную границу 8 м/с (рис. 1), можно отметить, что в осенний период, когда температура грунта максимальна, мощность теплового потока к воздуху может достигать порядка 0,05 кВт/м², опускаясь до 0,03 кВт/м² в зимние месяцы отопительного периода. Понижение температуры воздуха в начале участка отвечает физическим представлениям на увеличение теплового потока к воздуху (рис. 3, 4).

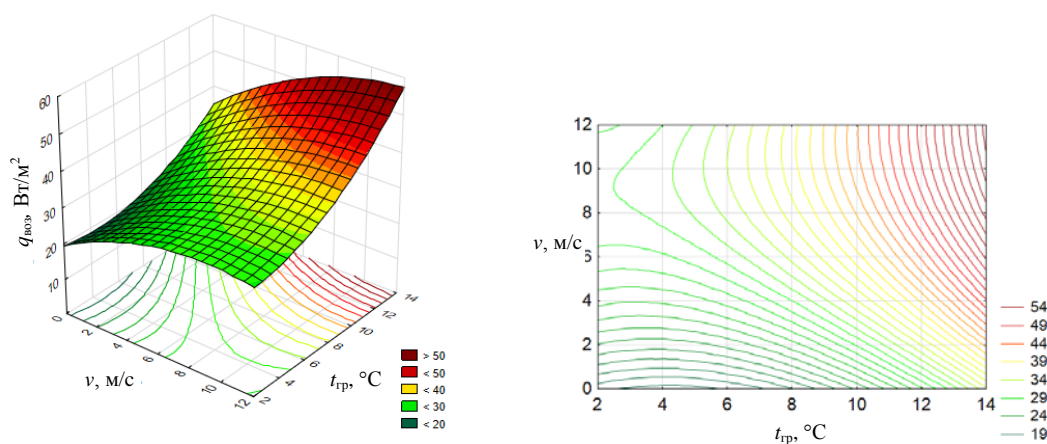


Рис. 2. Двумерные сечения гиперповерхности, описывающей мощность удельного (на 1 м² омываемых потоком воздуха поверхностей канала) теплового потока $q_{\text{воз}}$ в зависимости от скорости потока воздуха в канале и температуры грунта вокруг канала, при постоянных длине участка ($L = 60$ м), температурах воздуха в начале участка ($t_{\text{воз}} = -1,6$ °C) и прямой и обратной сетевой воды ($t_{\text{ПСВ}} = 90$ °C, $t_{\text{ОСВ}} = 49,5$ °C)

Fig. 2. Two-dimensional sections of hypersurface describing power of specific (per 1 m² washed by air flow channel surfaces) heat flow q_{air} depending on air flow rate in channel and soil temperature around channel, with constant section length ($L = 60$ m), air temperatures at the beginning of section ($t_{\text{air}} = -1.6$ °C) and direct (DNW) and return (RNW) network water ($t_{\text{DNW}} = 90$ °C, $t_{\text{RNW}} = 49.5$ °C)

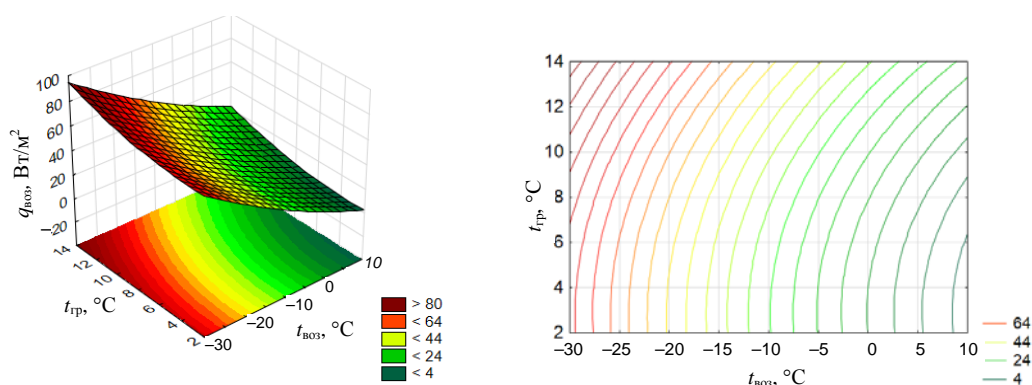


Рис. 3. Двумерные сечения гиперповерхности, описывающей мощность удельного (на 1 м² омываемых потоком воздуха поверхностей канала) теплового потока $q_{\text{воз}}$ в зависимости от температуры воздуха в начале участка и температуры грунта вокруг канала (при постоянных факторах, согласно рис. 2, на нулевых значениях плана)

Fig. 3. Two-dimensional sections of hypersurface describing power of specific (per 1 m² washed by air flow channel surfaces) heat flow q_{air} depending on air temperature at the beginning of section and soil temperature around channel (at constant factors, according to Fig. 2, at zero values of plan)

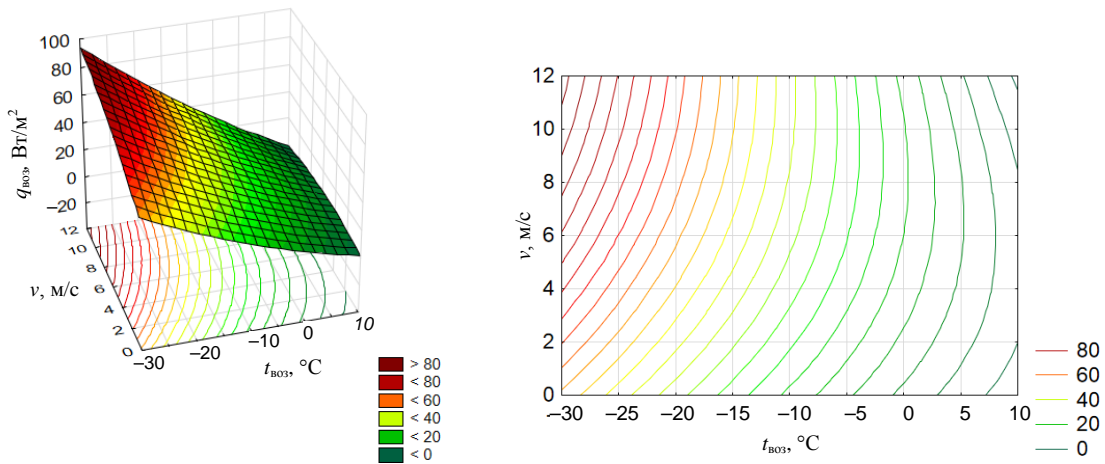


Рис. 4. Двумерные сечения гиперповерхности, описывающей мощность удельного (на 1 м² омываемых потоком воздуха поверхностей канала) теплового потока $q_{\text{воз}}$ в зависимости от температуры воздуха в начале участка и скорости воздуха (при постоянных факторах, согласно рис. 2, на нулевых значениях плана)

Fig. 4. Two-dimensional sections of hypersurface describing power of specific (per 1 m² washed by air flow channel surfaces) heat flow q_{air} depending on air temperature at the beginning of section and air speed (at constant factors, according to Fig. 2, at zero values of plan)

Следует отметить определяющее влияние температуры воздуха в начале участка в сечениях рис. 3, 4. При этом влияния изменений температуры грунта практически не заметно, притом что изменение скорости потока воздуха влияет сильнее на мощность удельного (на 1 м² омываемых потоком воздуха поверхностей канала) теплового потока $q_{\text{воз}}$.

Характер рассеяния теплоты сетевой воды, как прямой, так и обратной, идентичен, что можно связать с нивелирующим воздействием изоляции на температуру омываемых воздухом поверхностей обоих трубопроводов. Вместе

с тем при идентичном влиянии факторов на рассеяние теплоты трубопроводами теплотрассы при очевидном отличии температур указанных теплоносителей имеет место ожидаемое отличие абсолютных значений потоков рассеяния теплоты (рис. 5, 6).

Идентичность изменения потоков рассеяния теплоты трубопроводами сетевой воды, как прямой, так и обратной, позволяет ограничиться рассмотрением изменения потерь одного из двух указанных трубопроводов сетевой воды (рис. 7–11).

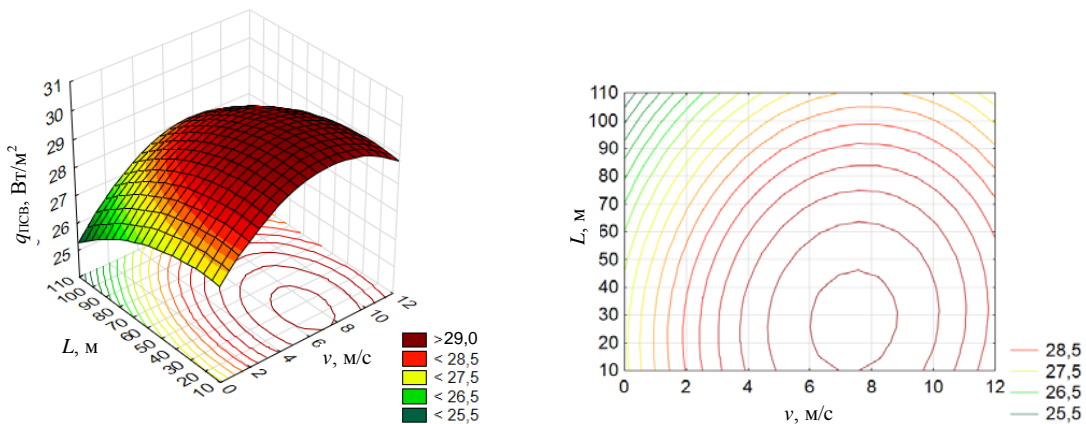


Рис. 5. Двумерные сечения гиперповерхности, описывающей мощность удельного (на 1 м² поверхностей трубопровода прямой сетевой воды) теплового потока $q_{\text{псв}}$ в зависимости от длины участка и скорости потока воздуха (при постоянных факторах, согласно рис. 2, на нулевых значениях плана)

Fig. 5. Two-dimensional sections of hypersurface describing power of specific (per 1 m² of direct network water pipeline surfaces) heat flow q_{DNW} depending on section length and air flow rate (at constant factors, according to Fig. 2, at zero values of plan)

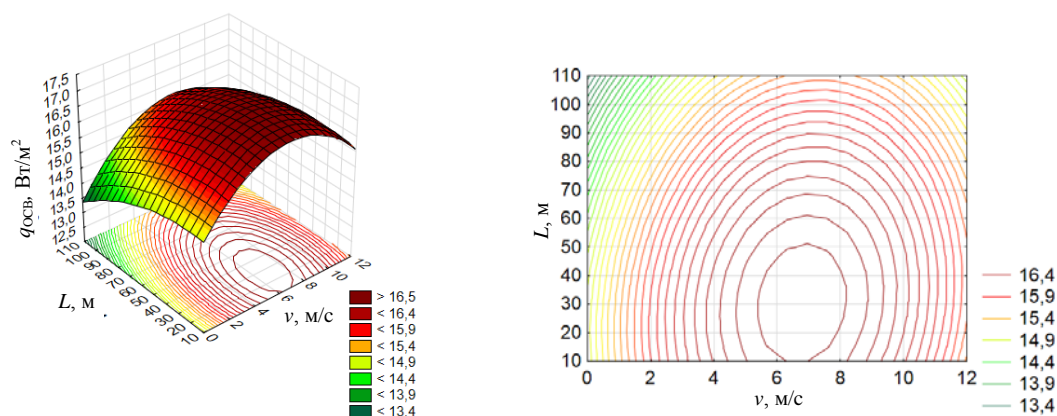


Рис. 6. Двумерные сечения гиперповерхности, описывающей мощность удельного (на 1 m^2 поверхностей трубопровода обратной сетевой воды) теплового потока q_{OCB} в зависимости от длины участка и скорости потока воздуха (при постоянных факторах, согласно рис. 2, на нулевых значениях плана)

Fig. 6. Two-dimensional sections of hypersurface describing power of specific (per 1 m^2 of return network water pipeline surfaces) heat flow q_{RNW} depending on section length and air flow rate (at constant factors, according to Fig. 2, at zero values of plan)

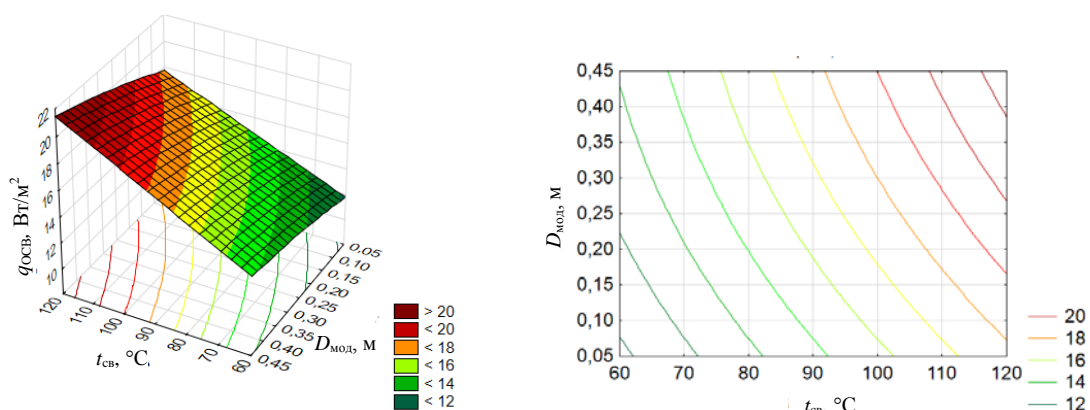


Рис. 7. Двумерные сечения гиперповерхности, описывающей мощность удельного (на 1 m^2 поверхностей трубопровода обратной сетевой воды) теплового потока q_{OCB} в зависимости от характеристик поперечного сечения канала и температуры сетевой воды (при постоянных факторах, согласно рис. 2, на нулевых значениях плана)

Fig. 7. Two-dimensional sections of hypersurface describing power of specific (per 1 m^2 of return network water pipeline surfaces) heat flow q_{RNW} depending on characteristics of channel cross-section and water network temperature (at constant factors, according to Fig. 2, at zero values of plan)

И температура теплоносителя, и характеристики канала теплотрассы имеют примерно равное влияние на рассеяние теплоты трубопроводами сетевой воды. Оба фактора определяются сетевыми районами в контексте требуемых расходов теплоты и теплогенерирующих источников, подготавливающих теплоноситель. Однако можно сделать вывод, что рассматриваемую утилизацию наиболее целесообразно реализовывать для теплотрасс с большими расходами теплоты и в отопительный период. Для всех значений температуры сетевой воды

скорость потока воздуха в канале не следует увеличивать более чем на 6 m/s (рис. 8). Длина продуваемого участка влияет незначительно в случае его небольшой протяженности, однако с увеличением длины отмечается тенденция к возрастанию ее влияния на удельные теплоты (рис. 9).

В рамках установленного ранее диапазона скоростей ($6\text{--}8 \text{ m/s}$) потока воздуха в канале рассеяние теплоты трубопроводами теплотрасс растет с увеличением размеров поперечного сечения канала (рис. 10). При этом верхний диапазон скорости соответствует 6 m/s .

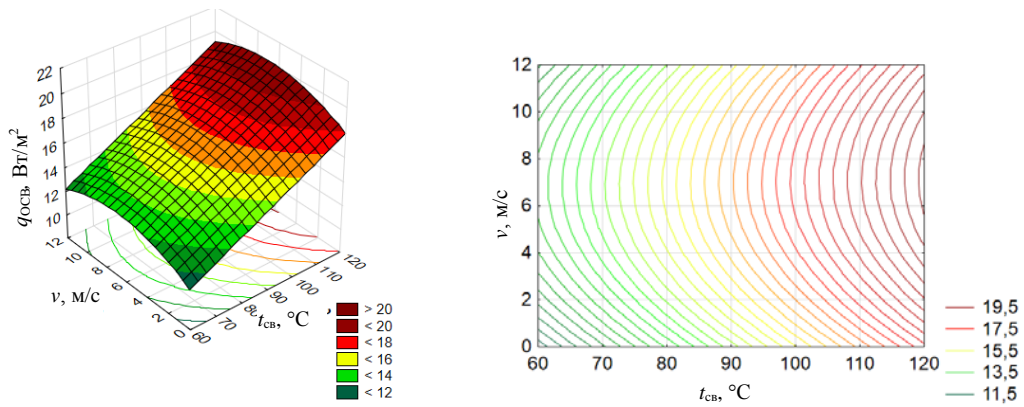


Рис. 8. Двумерные сечения гиперповерхности, описывающей мощность удельного (на 1 м² поверхностей трубопровода обратной сетевой воды) теплового потока $q_{\text{ОСВ}}$ в зависимости от скорости воздуха в канале и температуры сетевой воды (при постоянных факторах, согласно рис. 2, на нулевых значениях плана)

Fig. 8. Two-dimensional sections of hypersurface describing power of specific (per 1 m² of return network water pipeline surfaces) heat flow q_{RNW} depending on air speed in channel and temperature of network water (at constant factors, according to Fig. 2, at zero values of plan)

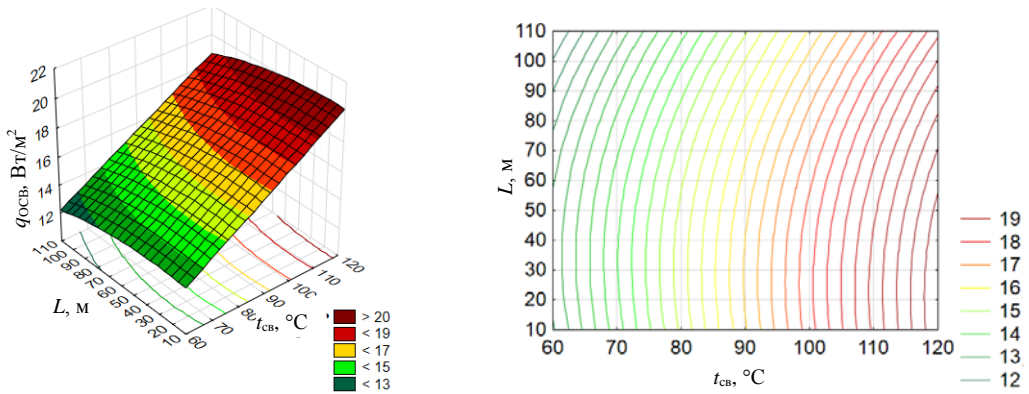


Рис. 9. Двумерные сечения гиперповерхности, описывающей мощность удельного (на 1 м² поверхностей трубопровода обратной сетевой воды) теплового потока $q_{\text{ОСВ}}$ в зависимости от длины участка канала и температуры сетевой воды (при постоянных факторах, согласно рис. 2, на нулевых значениях плана)

Fig. 9. Two-dimensional sections of hypersurface describing power of specific (per 1 m² of return network water pipeline surfaces) heat flow q_{RNW} depending on channel section length and temperature of network water (at constant factors, according to Fig. 2, at zero values of plan)

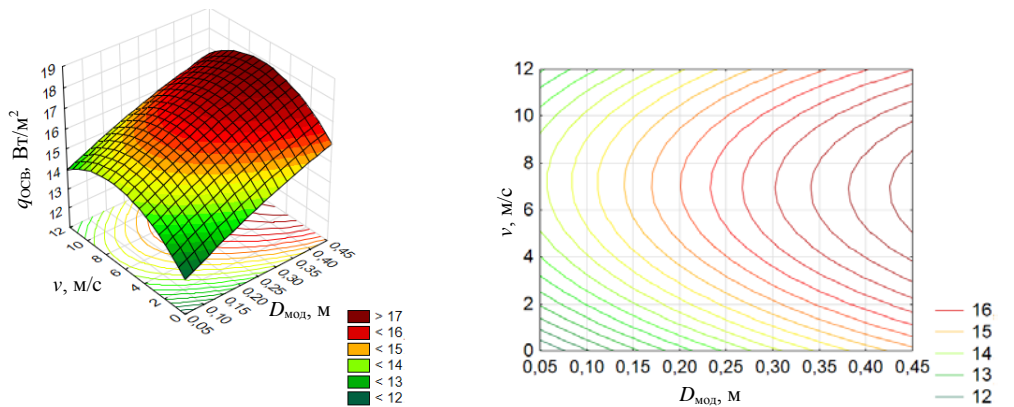


Рис. 10. Двумерные сечения гиперповерхности, описывающей мощность удельного (на 1 м² поверхностей трубопровода обратной сетевой воды) теплового потока $q_{\text{ОСВ}}$ в зависимости от скорости воздуха в канале и характеристик его поперечного сечения (при постоянных факторах, согласно рис. 2, на нулевых значениях плана)

Fig. 10. Two-dimensional sections of hypersurface describing power of specific (per 1 m² of return network water pipeline surfaces) heat flow q_{RNW} depending on air speed in channel and characteristics of its cross-section (at constant factors, according to Fig. 2, at zero values of plan)

При малых длинах продуваемого участка определяющее влияние на теплотери имеют размеры сечения канала (рис. 11). Однако при длине каналов более 60 м влияние размеров их поперечного сечения нивелируется и удельные теплотери зависят прежде всего от длины канала.

Обобщая полученные результаты зависимости интегрального удельного теплового (на 1 м² омываемых воздухом поверхностей канала) потока $q_{\text{взд}}$ к воздуху, продуваемому через канал, и потока удельных (на 1 м² поверхностей трубопроводов сетевой воды) тепловых потерь теплотрасс $q_{\text{св}}$, с учетом соотношения площадей наружных поверхностей теплотрасс и омыва-

емых воздухом всех поверхностей внутри канала (для минимального размера трубопроводов и длины в нулевой точке плана: площадь канала – 175,2 м², площадь поверхности трубопроводов – 50,1 м²; для максимального диаметра трубопроводов соответственно 660,0 и 258,5 м²), можно отметить, что значительный вклад тепловых потоков к воздуху осуществляется за счет отвода теплоты от грунта, что продемонстрировано на графиках рис. 12–16.

Наибольший эффект замечен в холодные месяцы отопительного периода, когда температура воздуха в начале участка низка, и скорость продувки канала воздухом должна быть большей (рис. 12).

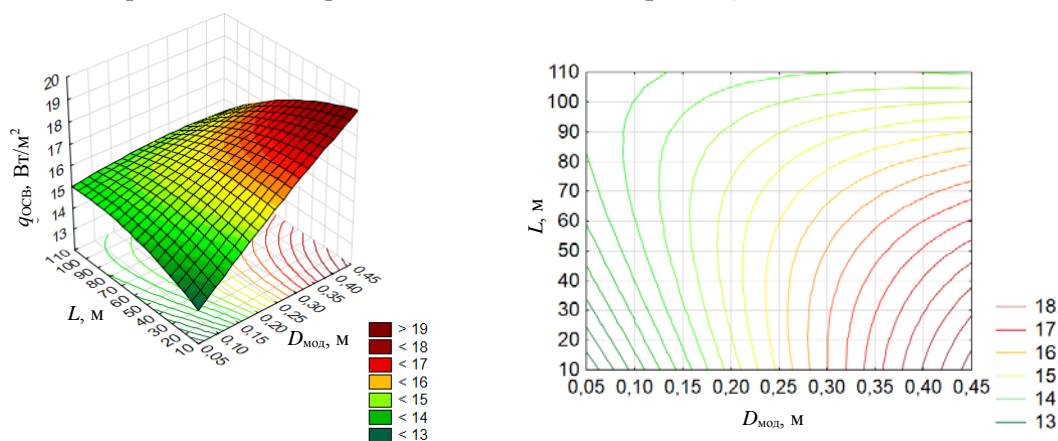


Рис. 11. Двумерные сечения гиперповерхности, описывающей мощность удельного (на 1 м² поверхностей трубопровода обратной сетевой воды) теплового потока $q_{\text{осв}}$ в зависимости от длины участка канала и характеристик его поперечного сечения (при постоянных факторах, согласно рис. 2, на нулевых значениях плана)

Fig. 11. Two-dimensional sections of hypersurface describing power of specific (per 1 m² of return network water pipeline surfaces) heat flow q_{RNW} depending on channel section length and characteristics of its cross-section (at constant factors, according to Fig. 2, at zero values of plan)

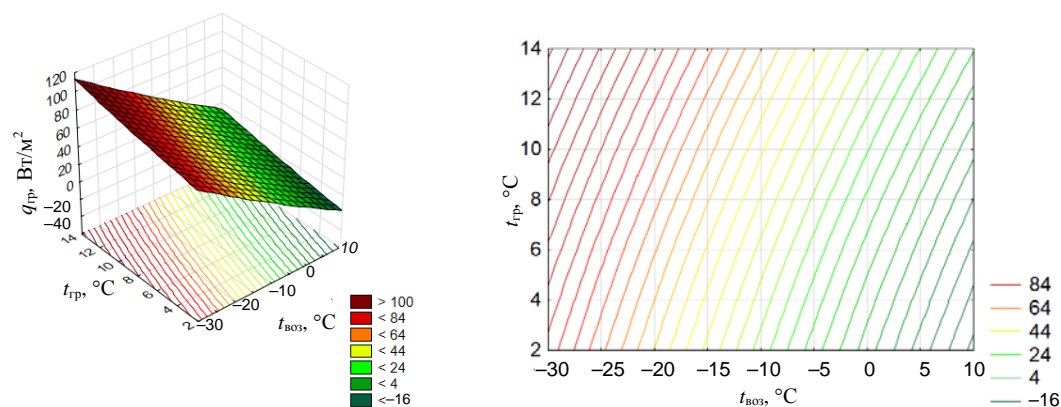


Рис. 12. Двумерные сечения гиперповерхности, описывающей мощность удельного (на 1 м² поверхностей ограждения канала) теплового потока грунта $q_{\text{гр}}$ в зависимости от температуры грунта и температуры воздуха в начале участка (при постоянных факторах, согласно рис. 2, на нулевых значениях плана)

Fig. 12. Two-dimensional sections of hypersurface describing power of specific (per 1 m² of channel barrier surfaces) heat flow of soil q_{soil} depending on soil and air temperature at the beginning of section (at constant factors, according to Fig. 2, at zero values of plan)

Влияние температуры сетевой воды на охлаждение грунта практически отсутствует, что ожидаемо. Главное влияние оказывает температура грунта вокруг канала (рис. 13).

Определяющий вклад в нагрев воздуха вносит тепловой поток процесса охлаждения грунта, при этом скорость воздуха следует ограничивать максимальной величиной на уровне 6 м/с (рис. 14–16).

Анализируя полученные функции отклика, можно отметить следующее:

– прокачка воздуха через каналы теплотрасс возможна с применением типовых тягодутьевых устройств для всей гаммы размеров тепло-

трасс. Протяженность участков теплотрасс, где возможна организация использования потоков теплоты охлаждения грунта и утилизации теплотерь теплотрасс, исходя из возможностей типовых тягодутьевых устройств оценивается несколькими километрами;

– величина низкотемпературного удельного (на 1 м² канала) теплового потока утилизации, отводимого с воздухом от грунта, оценивается мощностью потока теплоты от 2,0 кВт/м для теплотрасс с минимальным диаметром трубопровода до 3,6 кВт/м – с максимальным диаметром, что соответствует соотношению площадей наружных поверхностей скважин и каналов.

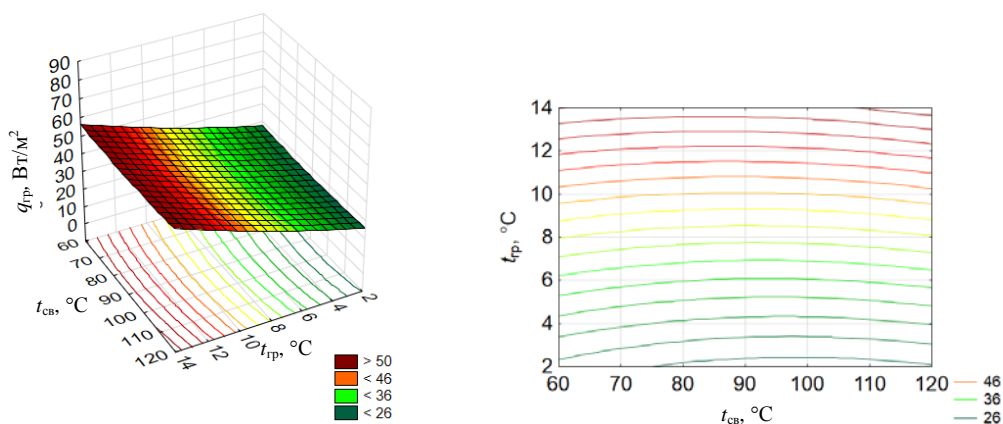


Рис. 13. Двумерные сечения гиперповерхности, описывающей мощность удельного (на 1 м² поверхностей ограждения канала) теплового потока грунта $q_{гр}$ в зависимости от температур грунта и сетевой воды (при постоянных факторах, согласно рис. 2, на нулевых значениях плана)

Fig. 13. Two-dimensional sections of hypersurface describing power of specific (per 1 m² of channel barrier surfaces) heat flow of soil q_{soil} depending on soil and network temperature (at constant factors, according to Fig. 2, at zero values of plan)

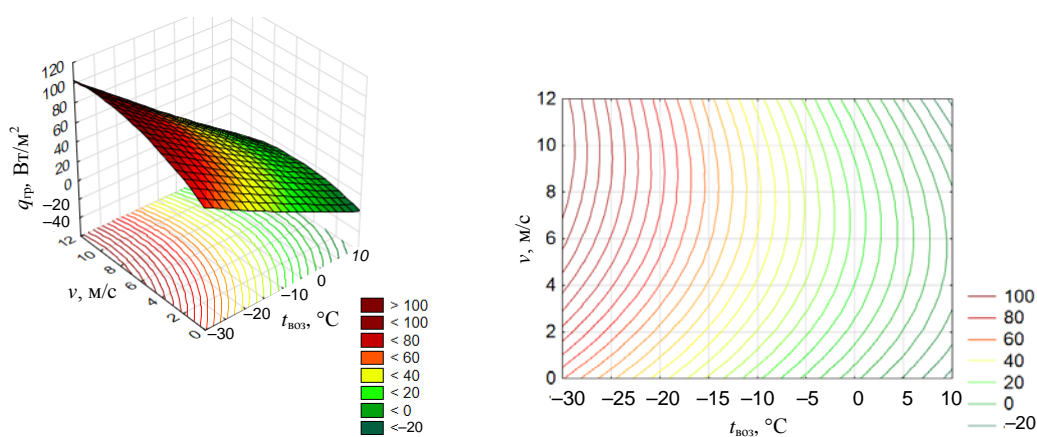


Рис. 14. Двумерные сечения гиперповерхности, описывающей мощность удельного (на 1 м² поверхностей ограждения канала) теплового потока грунта $q_{гр}$ в зависимости от скорости потока воздуха и температуры воздуха в начале участка (при постоянных факторах, согласно рис. 2, на нулевых значениях плана)

Fig. 14. Two-dimensional sections of hypersurface describing power of specific (per 1 m² of channel barrier surfaces) heat flow of soil q_{soil} depending on air flow rate and air temperature at the beginning of action (at constant factors, according to Fig. 2, at zero values of plan)

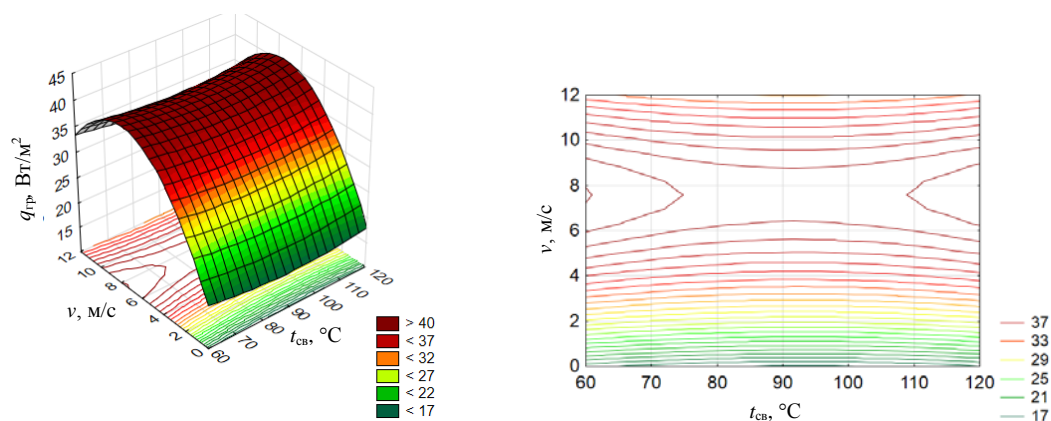


Рис. 15. Двумерные сечения гиперповерхности, описывающей мощность удельного (на 1 м^2 поверхностей ограждения канала) теплового потока грунта $q_{гр}$, в зависимости от скорости потока воздуха и температуры сетевой воды (при постоянных факторах, согласно рис. 2, на нулевых значениях плана)

Fig. 15. Two-dimensional sections of hypersurface describing power of specific (per 1 м^2 of channel barrier surfaces) heat flow of soil q_{soil} depending on air flow rate and network water temperature (at constant factors, according to Fig. 2, at zero values of plan)

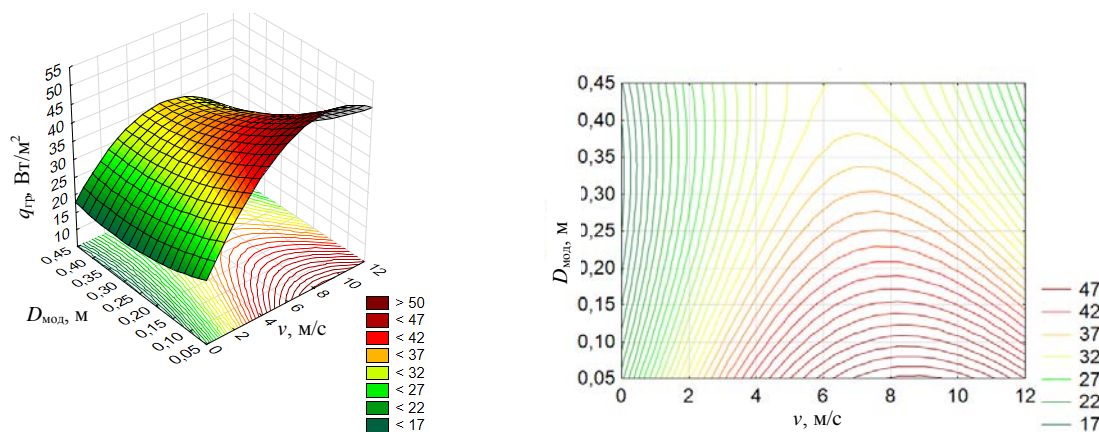


Рис. 16. Двумерные сечения гиперповерхности, описывающей мощность удельного (на 1 м^2 поверхностей ограждения канала) теплового потока грунта $q_{гр}$ в зависимости от скорости потока воздуха и характеристик поперечного сечения канала (при постоянных факторах, согласно рис. 2, на нулевых значениях плана)

Fig. 16. Two-dimensional sections of hypersurface describing power of specific (per 1 м^2 of channel barrier surfaces) heat flow of soil q_{soil} depending on air flow rate and characteristics of channel cross-section (at constant factors, according to Fig. 2, at zero values of plan)

ВЫВОДЫ

1. Получены регрессионные зависимости для определения тепловых потоков от поверхностей, омываемых воздухом, к потоку воздуха.

2. Проведены верификация и валидация результатов, что определило пригодность регрессионных соотношений для практического применения.

3. Полученные зависимости могут быть использованы для различных целей, например для разработки энергосберегающих мероприятий в тепловых сетях с непроходными канала-

ми путем регенерации потоков теплоты, рассеиваемых трубопроводами сетевой воды, утилизации теплоты охлаждения грунта и наружного воздуха.

4. Уменьшение расхода топлива в системах теплоснабжения за счет регенерации тепловых потоков рассеяния от теплотрасс в непроходных каналах в сумме с теплотой охлаждения грунта вокруг теплотрасс может достигать 10 % теплоты, доставляемой потребителям, что делает актуальным решение задачи использования указанного потока теплоты.

ЛИТЕРАТУРА

1. Седнин, В. А. Системы регенеративно-утилизационного теплоиспользования для теплотрасс в непроходных каналах / В. А. Седнин, Т. В. Бубырь // Энергия и менеджмент. 2017. № 4. С. 2–6.
2. Седнин, В. А. Численное исследование сложного теплообмена в продуваемых непроходных каналах теплотрасс / В. А. Седнин, Т. В. Бубырь // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2019. Т. 62, № 1. С. 61–76. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-1-61-76>.
3. Халафян, А. А. Промышленная статистика. Контроль качества, анализ процессов, планирование экспериментов в пакете STATISTICA / А. А. Халафян. М.: Libroком, 2013. 384 с.
4. Тихомиров, В. Б. Планирование и анализ эксперимента (при проведении исследований в легкой и текстильной промышленности) / В. Б. Тихомиров. М.: Легкая индустрия, 1974. 262 с.
5. Шестаков, В. Н. Планирование эксперимента в оптимизационных задачах технической мелиорации грунтов / В. Н. Шестаков. Омск: Изд-во СибАДИ, 2007. 95 с.
6. Тарасик, В. П. Математическое моделирование технических систем / В. П. Тарасик. Минск: Новое знание, 2013. 584 с.
7. Обзор STATISTICA [Электронный ресурс] // StatSoft Russia. Режим доступа: <http://statsoft.ru/products/overview/>. Дата доступа: 21.01.2018.
8. Боровиков, В. П. Популярное введение в современный анализ данных в системе STATISTICA / В. П. Боровиков. М.: Горячая линия-Телеком, 2013. 288 с.
9. Марченко, А. В. Разработка технологий использования котлоагрегатов ТЭЦ и их дутьевых вентиляторов для транспорта и утилизации вентиляционных выбросов промышленных предприятий и автомагистралей / А. В. Марченко. Ульяновск, 2008. 175 с.
10. Справочник по наладке и эксплуатации водяных тепловых сетей / В. И. Манюк [и др.]; 3-е изд., перераб. и доп. М.: Стройиздат, 1988. 432 с.
11. Сапрыкина, Н. Ю. Исследование влияния на температуру грунта геотермальной системы теплоснабжения и кондиционирования в комплексе с тепловым насосом, при долговременном нестационарном циклическом режиме работы / Н. Ю. Сапрыкина // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. 2018. Т. 25, № 3. С. 19–27.

Поступила 25.02.2021

Подписана в печать 22.04.2021

Опубликована онлайн 31.05.2021

REFERENCES

1. Sednin V. A., Bubyry T. V. (2017) Systems of Regenerative Recovery Heat use for Heating Mains in No-Pass Channels. *Energiya i Menedzhment* [Energy and Management], (4), 2–6 (in Russian).
2. Sednin V. A., Bubyry T. V. (2019) Numerical Study of Complex Heat Transfer in Blown Impassable Channels of Heating Mains. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 62 (1), 61–76. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-1-61-76> (in Russian).
3. Khalafyan A. A. (2013) *Industrial Statistics. Quality Control, Process Analysis, Experimental Planning in the STATISTICA Package*. Moscow, Librokom Publ. 384 (in Russian).
4. Tikhomirov V. B. (1974) *Planning and Analysis of Experiment (when Conducting Research in Light and Textile Industries)*. Moscow, Liogkaya Industriya Publ. 262 (in Russian).
5. Shestakov V. N. (2007) *Planning an Experiment in Optimization Problems of Technical Land Reclamation*. Omsk, Publishing House of Siberian State Automobile and Highway University. 95 (in Russian).
6. Tarasik V. P. (2013) *Mathematical Modeling of Technical Systems*. Minsk, Novoe Znanie Publ. 584 (in Russian).
7. STATISTICA. *StatSoft Russia*. Available at: <http://statsoft.ru/products/overview/>. (Accessed 21 January 2018) (in Russian).
8. Borovikov V. P. (2013) *Popular Introduction to Modern Data Analysis with STATISTICA System*. Moscow, Goryachaya Liniya-Telekom Publ. 288 (in Russian).
9. Marchenko A. V. (2008) *Development of Technologies for the Use of CHP Boiler Units and their Blowing Fans for Transport and Utilization of Ventilation Emissions from Industrial Enterprises and Highways*. Ulyanovsk, 175 (in Russian).
10. Manyuk V. I., Kaplinskii Ya. I., Khizh E. B., Manyuk A. I., Il'in V. K. (1988) *Handbook for the Adjustment and Operation of Water Heating Networks*. 3rd ed. Moscow, Stroizdat Publ. 432 (in Russian).
11. Saprykina N. Yu. (2018) Study of the Effect of Geothermal Heat Supply System on Soil Temperature and Air Conditioning in a Complex with a Heat Pump, with Long-term Non-Stationary Cyclic Operation. *Inzhenerno-Stroitelny Vestnik Prikaspiya = Engineering and Construction Bulletin of the Caspian Region*, 25 (3), 19–27 (in Russian).

Received: 25.02.2021

Accepted: 22.04.2021

Published online: 31.05.2021