

## Исследование теплообмена в продуваемых непроходных каналах теплотрасс

### Часть 1

Докт. техн. наук, проф. В. А. Седнин<sup>1)</sup>, магистр техн. наук Т. В. Бубырь<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>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 и одновременно показана проблематичность создания приемлемой натурной экспериментальной установки или сложность проведения пассивного эксперимента на существующих теплотрассах в непроходных каналах. В качестве альтернативного решения для выполнения исследований предлагается создать и использовать виртуальную экспериментальную установку, разработанную на базе программного комплекса ANSYS, получившего широкое признание в мире. Начальные результаты верификации модели показали перспективность изучения теплообмена и аэродинамики в продуваемых непроходных каналах теплотрасс с использованием такого решения. Выполнено исследование с помощью виртуальной экспериментальной установки на базе шестифакторного ротативного плана второго порядка, содержащего 46 точек на гипершаре с шестью звездными точками. Показано отсутствие необходимости рандомизации порядка проведения и повторения исследования в точках плана проведения вычислительного эксперимента. Получены уравнения регрессии второго порядка для расчета комплекса целевых функций: требуемого напора воздуха для достижения заданной скорости потока, интенсивности теплоотдачи непосредственно от труб теплотрассы, а также от стенок канала к продуваемому воздуху. В качестве влияющих факторов при вычислениях приняты: геометрия каналов типовых размеров теплотрасс, длина участков, температуры наружного воздуха и грунта, скорость потока воздуха в канале. Для полученных уравнений регрессии установлены значимые коэффициенты и осуществлен переход от безразмерных факторов к натуральным. С использованием стандартных статистических методов оценок на базе рассчитанных значений критериев Фишера, Стьюдента и других определена адекватность полученных уравнений регрессии.

**Ключевые слова:** теплоснабжение, непроходные каналы, теплотрасса, теплообмен, аэродинамическое сопротивление канала, ANSYS, математическое моделирование, верификация, использование теплоты грунта, виртуальная модель, уравнение регрессии, шестифакторный эксперимент

**Для цитирования:** Седнин, В. А. Исследование теплообмена в продуваемых непроходных каналах теплотрасс. Часть 1 / В. А. Седнин, Т. В. Бубырь // *Наука и техника*. 2021. Т. 20, № 2. С. 150–160. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-2-150-160>

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

### Part 1

V. A. Sednin<sup>1)</sup>, T. V. Bubyr<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

**Abstract.** To increase the efficiency of operation of heating networks located in non-passable channels, a schematic and structural solution of regenerative-utilization heat use was previously proposed and at the same time it is shown that it is

#### 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

difficult to create an acceptable full-scale experimental installation or the difficulty of conducting a passive experiment on existing heating mains in non-passable channels. As an alternative solution for performing research, it is proposed to create and use a virtual experimental setup developed on the basis of the ANSYS software package, which has received wide recognition in the world. The initial results of model verification showed that the study of heat transfer and aerodynamics in blown-through non-passable heating mains using such a solution is promising. A study has been carried out using a virtual experimental setup based on a six-factor second-order rotatable plan containing 46 points on a hypersphere with six star points. It is shown that there is no need to randomize the order of conducting and repeating the study at the points of computational experiment plan. Second-order regression equations have obtained for calculating a complex of objective functions: the required air pressure to achieve a given flow rate, the intensity of heat transfer directly from the pipes of the heating main, as well as from the walls of the channel to the blown air. The geometry of the channels of typical standard sizes of heating mains, the length of the sections, the temperature of the outside air and soil, and the air flow rate in the channel have been taken as the influencing factors in the calculations. For the obtained regression equations, significant coefficients have been established and the transition from dimensionless to natural factors has been carried out. 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.

**Keywords:** heat supply, nonpassable channels, heating main, heat exchange, aerodynamic channel drag, ANSYS, math modeling, verification, utilization of soil heat, virtual model, 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 1. *Science and Technique*. 20 (2), 150–160. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-2-150-160> (in Russian)

## Введение

Ранее в [1, 2] для повышения эффективности эксплуатации тепловых сетей, размещенных в непроходных каналах, предложено схемно-структурное решение регенеративно-утилизационного теплоиспользования, что позволило определить актуальность соответствующих экспериментальных исследований. Определена проблематичность создания приемлемой натурной экспериментальной установки или сложность проведения пассивного эксперимента на существующих теплотрассах в непроходных каналах. В качестве альтернативного решения для выполнения исследований предложено создать и использовать виртуальную экспериментальную установку, разработанную на базе программного комплекса ANSYS, широко признанного в мире. Начальные результаты верификации полученной с помощью ANSYS виртуальной модели показали перспективность предложенного решения по исследованию теплообмена и аэродинамики в продуваемых непроходных каналах теплотрасс.

Экспериментальные исследования в большинстве случаев удобно осуществлять с привлечением методов математического планирования и обработки получаемых данных. К сожалению, методик выбора плана проведения

эксперимента для реализации метода математического планирования нет. Определение числа факторов, их ранжирование, обоснование диапазонов изменения факторов для выбранных исследуемых функций цели проводятся на основании:

- экспертных оценок самих участников, связанных с проведением эксперимента;
- сторонних исследователей;
- имеющихся литературных данных в конкретной области знаний [3–6].

Такой подход необходим для лучшего понимания роли тех или иных физических величин в протекании рассматриваемых процессов и особенностей их осуществления под воздействием каждого фактора. Наконец, факторы, принятые для проведения исследования, не должны зависеть друг от друга. Выбор факторов, обоснование диапазона их изменения и ранжирование отражены в [1, 2].

## Выбор плана проведения эксперимента и влияющих факторов

Используя таблицы планов проведения активного эксперимента [3, 4], рекомендации по выбору определенного плана [5–7], к реализации принят шестифакторный, ротатбельный план второго порядка (табл. 1).

План проведения эксперимента  
Experiment plan

№ точки плана	Фактор						№ точки плана	Фактор						№ точки плана	Фактор						
	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	X <sub>5</sub>	X <sub>6</sub>		X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	X <sub>5</sub>	X <sub>6</sub>		X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	X <sub>5</sub>	X <sub>6</sub>	
1	-	-	-	-	-	-	17	+	-	-	-	-	+	33	-*	0	0	0	0	0	0
2	-	-	-	-	-	+	18	+	-	-	-	-	+	34	*	0	0	0	0	0	0
3	-	-	-	+	-	+	19	+	-	-	+	-	-	35	0	-*	0	0	0	0	0
4	-	-	-	+	+	-	20	+	-	-	+	+	+	36	0	*	0	0	0	0	0
5	-	-	+	-	-	+	21	+	-	+	-	-	-	37	0	0	-*	0	0	0	0
6	-	-	+	-	+	-	22	+	-	+	-	+	+	38	0	0	*	0	0	0	0
7	-	-	+	+	-	-	23	+	-	+	+	-	+	39	0	0	0	-*	0	0	0
8	-	-	+	+	+	+	24	+	-	+	+	+	-	40	0	0	0	*	0	0	0
9	-	+	-	-	-	+	25	+	+	-	-	-	-	41	0	0	0	0	-*	0	0
10	-	+	-	-	+	-	26	+	+	-	-	+	+	42	0	0	0	0	*	0	0
11	-	+	-	+	-	-	27	+	+	-	+	-	+	43	0	0	0	0	0	-*	0
12	-	+	-	+	+	+	28	+	+	-	+	+	-	44	0	0	0	0	0	0	*
13	-	+	+	-	-	-	29	+	+	+	-	-	+	45	0	0	0	0	0	0	0
14	-	+	+	-	+	+	30	+	+	+	-	+	-	46	0	0	0	0	0	0	0
15	-	+	+	+	-	+	31	+	+	+	+	-	-								
16	-	+	+	+	+	-	32	+	+	+	+	+	+								

Функции отклика исследовались в зависимости от следующих факторов:

- характерного размера, определяющего геометрию канала в поперечном сечении,  $X_{\text{поп}} (X_1)$ , м;
- характерного размера, определяющего геометрию канала в продольном сечении,  $X_{\text{прод}} (X_2)$ , м;
- скорости потока воздуха в канале  $\omega (X_3)$ , м/с;
- температуры сетевой воды: прямой  $t_{\text{ПСВ}}$  и обратной  $t_{\text{ОСВ}} (X_4)$ , °С;
- температуры наружного воздуха  $t_{\text{н.вз}} (X_5)$ , °С;
- температуры грунта на глубине залегания канала  $t_{\text{гр}} (X_6)$ , °С.

В вычислительных экспериментах опыты выполнены в соответствии с матрицей плана. Кроме того, в рассматриваемом варианте исследований предполагается отсутствие систематических ошибок, что исключает необходимость в рандомизации последовательности проведения опытов [7].

В расчетах поток воздуха движется в одном направлении с прямой сетевой водой (ПСВ) от начала участка, где задаются температуры потоков воздуха и ПСВ, к окончанию участка, где указанные температуры рассчитываются в программном комплексе ANSYS. Для обратной сетевой воды (ОСВ) имеет место противоток потоку воздуха, и температура ОСВ задается в выходном сечении участка и рассчитывается во входном. Температуры потоков сетевой во-

ды задаются предельными для конкретного графика с учетом парного соответствия соотношения температур прямой и обратной воды. В практических расчетах, естественно, температуры сетевой воды могут отличаться за счет теплопотерь в канале и отвода теплоты у потребителя. Но поскольку они будут находиться внутри диапазона предельных значений температур потоков, уравнения регрессии дадут результат, учитывающий отклонения температур от предельных.

### Этапы работы с программным комплексом ANSYS

*Построение расчетной сетки конечных элементов.* Первый, и весьма важный, этап связан с построением расчетной сетки для выполнения вычислений в ANSYS. Для построения сетки предлагаются различные сеточные модули в составе ANSYS: ANSYS Meshing, ANSYS ICEM CFD, ANSYS Fluent Meshing. Модуль ICEM CFD применим для сложных геометрий, позволяет строить сетку по плохо связанному набору геометрических данных, что невозможно сделать при помощи других инструментов [8]. ANSYS Fluent Meshing применяется для построения больших неструктурированных тетраэдрических, ортогональных, полиэдрических и сеток с преобладанием гексаэдров для очень сложных геометрических моделей, широко используется в аэрокосмической и автомобильной

отраслях, например при моделировании подкапотного пространства карьерных самосвалов или для конструирования болидов F1 [9]. ANSYS Meshing является универсальным, многофункциональным, автоматизированным и высокопроизводительным продуктом, создающим сеточную модель для точных эффективных многодисциплинарных расчетов [10, 11]. Данный модуль генерирует сетку с учетом области физики, к которой относится задача, и типа решателя, используемого в работе ANSYS. В своем исследовании авторы для генерации сетки применяли модуль ANSYS Meshing.

Важный фактор построения сетки – соответствие канонической формы элементов разбиения сложности конструкции канала. При построении сетки использовались элементы в форме тетраэдра, пирамиды, призмы. Однако для получения структурированной сетки большая часть элементов была построена шестигранниками. Определяющий максимальный размер элемента разбиения и его каноническая форма – следующие по важности факторы при выборе сетки, от которых в том числе зависит выполнение сходимости процесса численного решения. Другое условие выбора сетки – обеспечение требуемой точности решения. Общее число элементов в расчетах рассматриваемой экспериментальной модели колебалось от 5 до 15 млн единиц – это связано как с максимальной длиной участка (100 м), так и с максимальным поперечным сечением канала (1,7×2,5 м). Кроме того, расчетное сечение включало грунт вокруг канала на толщину до 0,5 м. При этом минимальная длина канала сечением 1,5×2,0 м составляла 20 м. Вблизи поверхностей рассматриваемой геометрии укладывался тонкий слой призматических элементов толщиной, обеспечивающей безразмерный параметр  $y^+$  в диапазоне 30–100. Сходимость процесса определялась по достижении совпадения соседних значений итераций температуры, напора, массового расхода, характеризующихся величиной менее  $10^{-3}$ , что достигалось после 2 тыс. итераций. Процесс построения сетки производился для девяти конфигураций канала экспериментальной установки, время построения сетки для каждой конфигурации в среднем занимало от 2 до 6 ч. Для решения использовался принадлежащий ИТМО НАН Беларуси компьютер с 26 ядрами и 128 Гб ОЗУ, на котором был установлен лицензионный пакет ANSYS.

*Расчетные пакеты ANSYS.* Следующий этап исследования связан с расчетами непосредственно в точках матрицы плана проведения эксперимента (табл. 1). Для этого из состава ANSYS был выбран пакет CFX, который, согласно рекомендациям, при минимальных временных затратах дает ожидаемый результат [11]. При этом для различных точек плана время расчета изменяется от 3 до 24 ч. Окончания итераций определялись из выполнения таких условий, как: стабилизация при переходе от одной итерации к другой таких параметров, как температура, массовый расход теплоносителя, давление, плотность теплового потока. Погрешность получаемых результатов оценивалась в 5–10 %.

Очевидно, что громоздкость процесса получения результатов с использованием программного комплекса ANSYS мало приемлема в инженерной практике. Это подтверждает необходимость получения на основе экспериментального исследования с помощью данного пакета более простых соотношений, например уравнений регрессии, отвечающих требованиям практического применения.

Таким образом, с помощью программного комплекса ANSYS в зависимости от перечисленных факторов в каждой точке плана рассчитывались: потери напора продуваемого потока воздуха на участке канала, температуры на выходе потока воздуха и сетевой воды в прямом и обратном трубопроводах. Достижением сходимости итерационных процессов указанных расчетов считался выход на плато графиков уравнений импульса, баланса масс, энергий, турбулентности. Время расчетов каждой точки плана находилось в диапазоне 16–24 ч. В качестве примера сходимости для одной из точек плана показаны на рис. 1–4.

Анализируя рис. 1, 2, можно отметить, что для потока сетевой воды при движении в трубопроводе не возникает проблем со сходимостью решения, в то же время для воздуха вследствие наличия ряда местных сопротивлений имеют место пульсации потока воздуха, что осложняет сходимость процесса решения.

Данные рис. 3 позволяют считать, что выбранная модель турбулентности  $k-\omega SST$  хорошо описывает протекающие в канале процессы. Из рис. 4 видно, что дисбалансы решаемых уравнений достигают нулевых значений, и это указывает на окончание процесса решения.

Результаты работы программного комплекса ANSYS для всех точек плана приведены в табл. 2.

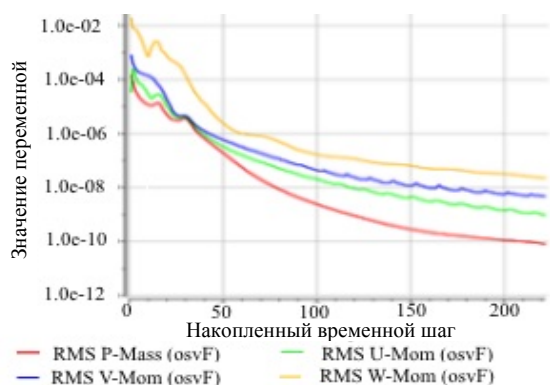


Рис. 1. Сходимость уравнений сохранения импульса и баланса масс для потока сетевой воды

Fig. 1. Convergence of momentum conservation equations and mass balance for flow of network water

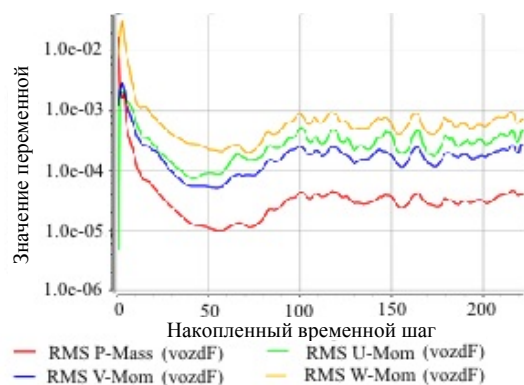


Рис. 2. Сходимость уравнений сохранения импульса и баланса масс для потока воздуха

Fig. 2. Convergence of momentum conservation equations and mass balance for air flow

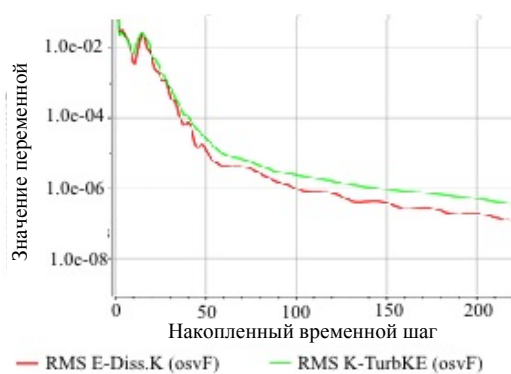


Рис. 3. Сходимость решений для уравнений выбранной модели турбулентности

Fig. 3. Convergence of solutions for equations of selected turbulence model

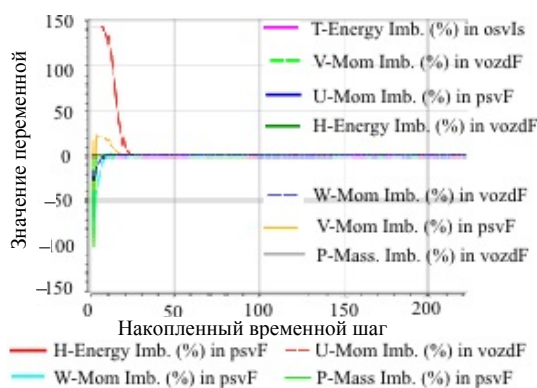


Рис. 4. Дисбалансы решаемых уравнений для всех теплоносителей

Fig. 4. Imbalances of equations being solved for all heat carriers

Таблица 2

Результаты работы программного комплекса ANSYS для всех точек плана  
Results of ANSYS software package for all points of the plan

№ точки плана	Температура выхода $t$ , °C			$\Delta p$ , Па	№ точки плана	Температура выхода $t$ , °C			$\Delta p$ , Па	№ точки плана	Температура выхода $t$ , °C			$\Delta p$ , Па
	ПСВ	ОСВ	Воздух			ПСВ	ОСВ	Воздух			ПСВ	ОСВ	Воздух	
1	79,4960	44,9980	-10,88	40,4	17	79,4940	44,9960	-7,64	72	33	89,9990	49,4994	-7,28	27,1
2	79,4960	44,9980	1,05	38,6	18	79,4940	44,9970	1,57	69	34	89,9949	49,4971	-4,81	122
3	100	52,9970	-10,14	40,4	19	100,4920	52,9950	-8,23	72,6	35	89,9990	49,4990	-6,57	71,6
4	100	52,9980	0,65	38,7	20	100,4920	52,9960	2,79	69,1	36	89,9610	49,4780	-3,84	163
5	79,4960	44,9970	-12,50	195	21	79,4930	44,9960	-11,49	341	37	89,9972	49,4984	3,01	0,95
6	79,4970	44,9980	-0,42	185	22	79,4940	44,9970	0,67	324,	38	89,9968	49,4981	-6,84	277
7	100,4950	52,9970	-12,70	195	23	100,4910	52,9950	-10,86	342	39	65,0277	38,9985	-6,14	80,5
8	100,4960	52,9980	-0,04	185	24	100,4920	52,9960	0,30	324	40	114,9660	57,9979	-5,83	78,4
9	79,4984	44,9990	-12,38	11,5	25	79,4972	44,9983	-11,67	19,2	41	89,9963	49,4976	-20,53	86,9
10	79,4986	44,9992	-0,27	10,9	26	79,4976	44,9986	0,72	17,4	42	89,9973	49,4986	8,41	75,3
11	100,498	52,9988	-12,55	11,5	27	100,4970	52,9980	-11,17	19,3	43	89,9968	49,4982	-6,37	78,6
12	100,498	52,9990	0,12	10,9	28	100,4970	52,9984	0,50	17,4	44	89,9968	49,4982	-5,56	79,5
13	79,4984	44,9989	-13,67	54,4	29	79,4970	44,9980	-12,69	85,1	45	89,9968	49,4982	-5,94	77,8
14	79,4986	44,9992	-0,65	51,5	30	79,4976	44,9986	-0,44	80,7	46	89,9968	49,4982	-7,28	80,5
15	100,4980	52,9988	-13,47	54,4	31	100,4960	52,9980	-12,85	85,1					
16	100,4980	52,9990	-0,74	51,6	32	100,4970	52,9984	-0,11	80,7					

Непосредственно по результатам работы программного комплекса ANSYS не выводятся требуемые функции отклика, указанные выше. В этой связи значения требуемых функций отклика рассчитываются на базе полученных результатов работы упомянутого программного комплекса по зависимостям, приведенным в [2].

### Регрессионные уравнения

Функциями отклика определены:

– потери напора при продувке канала воздухом;

– удельные тепловые потоки к воздуху: суммарный от трубопроводов сетевой воды; отдельные от трубопроводов прямой и обратной сетевой воды; от ограждающих конструкций канала.

Для определения удельного теплового потока необходимо знать интегральный поток теплоты к воздуху, который определяется известным соотношением с использованием расхода потока воздуха ( $G_{\text{вх}}$ , кг/с), температур потока в начальном и конечном сечениях и теплоемкостей влажного воздуха изобарных, удельных массовых, средних в соответствующих интервалах температур при обобщенном влагосодержании 10 г/кг

$$Q_{\text{вх}} = G_{\text{вх}} \bar{c}_{p,\text{вх}} \Big|_{t_1}^{t_2} (t_2 - t_1), \quad (1)$$

где  $\bar{c}_{p,\text{вх}} \Big|_{t_1}^{t_2}$  – изобарная удельная массовая, средняя в интервале температур  $t_1$ – $t_2$  тепло-

емкость воздуха, Дж/(кг·°C);  $t_2, t_1$  – температура воздуха на выходе и входе участка, °C.

На базе приведенных результатов использования программного комплекса ANSYS по известным расходу и температурам сетевой воды не представляет проблем балансовым методом определить тепловой поток от трубопроводов к продуваемому воздуху. Это можно сделать отдельно для потока прямой и обратной сетевой воды

$$Q_{\text{св}} = G_{\text{св}} c_p (t_2 - t_1), \quad (2)$$

где  $G_{\text{св}}$  – массовый расход сетевой воды через трубопровод, кг/с;  $c_p$  – изобарная удельная массовая теплоемкость воды, Дж/(кг·°C);  $t_2, t_1$  – температура сетевой воды на выходе и входе участка, °C.

Разность интегрального потока теплоты к воздуху и тепловых потоков от трубопроводов сетевой воды позволяет установить теплоту, передаваемую потоку воздуха от ограждающих конструкций канала:

$$Q_{\text{кан}} = Q_{\text{вх}} - Q_{\text{св}}. \quad (3)$$

Удельный тепловой поток определялся как отношение полного интегрального потока теплоты к соответствующей площади поверхности теплоотдачи.

Результаты обработки данных табл. 2 по соотношениям (1)–(3) приведены в табл. 3.

На основании данных табл. 1, 3 аппроксимировались коэффициенты уравнений регрессии с использованием современных пакетов прикладных программ [12, 13].

Таблица 3

Результаты обработки данных табл. 2 по соотношениям (1)–(3)

Results of processing data of Table 2 by relations (1)–(3)

№ точки плана	Мощность удельных потоков теплоты «поверхность – воздух» $q$ , Вт/м <sup>2</sup>				№ точки плана	Мощность удельных потоков теплоты «поверхность – воздух» $q$ , Вт/м <sup>2</sup>				№ точки плана	Мощность удельных потоков теплоты «поверхность – воздух» $q$ , Вт/м <sup>2</sup>			
	ПСВ*	ОСВ*	Грунт**	Суммарный***		ПСВ*	ОСВ*	Грунт**	Суммарный***		ПСВ*	ОСВ*	Грунт**	Суммарный***
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	26,6	16,4	51,5	41,4	17	26,1	15,9	57,0	43,1	33	28,6	16,3	39,7	35,4
2	23,0	12,8	26,6	24,2	18	22,8	12,7	15,2	16,6	34	28,4	15,9	36,0	31,2
3	33,4	18,6	61,1	49,3	19	33,1	18,3	47,6	39,4	35	28,7	16,1	33,6	54,9
4	30,0	15,1	16,7	20,1	20	29,6	14,8	24,1	23,7	36	29,2	16,4	44,5	13,5
5	27,0	16,8	71,3	53,3	21	27,0	16,6	57,7	44,2	37	26,0	14,0	14,5	17,1
6	23,4	13,1	20,0	20,3	22	23,2	12,9	29,9	25,8	38	29,8	16,9	41,2	36,2
7	34,1	19,1	59,9	48,3	23	33,8	18,8	68,5	52,7	39	21,3	13,6	37,9	30,4

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
8	30,3	15,3	31,1	29,1	24	30,2	15,3	18,8	21,1	40	38,1	19,2	37,5	35,3
9	29,3	18,2	49,8	50,3	25	28,2	17,4	40,3	37,0	41	34,0	21,1	78,2	59,4
10	25,3	14,2	13,8	21,1	26	24,2	13,4	20,2	23,4	42	24,9	12,1	-1,66	7,07
11	37,0	20,7	41,8	46,7	27	35,3	19,7	48,1	43,1	43	29,5	16,7	26,5	26,6
12	32,8	16,6	21,5	29,3	28	31,2	15,8	12,6	20,9	44	29,4	16,6	48,7	39,8
13	30,0	18,6	48,0	50,0	29	28,7	17,7	55,4	54,7	45	29,4	16,6	37,6	33,6
14	25,8	14,4	25,0	29,9	30	24,8	13,8	15,4	22,2	46	29,4	16,7	37,7	33,0
15	37,6	21,4	57,0	59,6	31	35,9	20,1	46,4	50,3					
16	33,4	17,0	16,0	25,8	32	31,8	16,1	24,0	30,8					

\* На 1 м<sup>2</sup> поверхности изоляции трубопровода.

\*\* На 1 м<sup>2</sup> поверхности канала.

\*\*\* Суммарный поток теплоты к воздуху на 1 м<sup>2</sup> обдуваемых поверхностей теплоотдачи теплотрассы сетевой воды и канала.

В общем виде уравнение для поверхности отклика второго порядка запишется

$$Y_i = b_0 + b_1X_1 + b_2X_1^2 + b_3X_2 + b_4X_2^2 + b_5X_3 + b_6X_3^2 + b_7X_4 + b_8X_4^2 + b_9X_5 + b_{10}X_5^2 + b_{11}X_5 + b_{12}X_6^2 + b_{13}X_1X_2 + b_{14}X_1X_3 + b_{15}X_1X_4 + b_{16}X_1X_5 + b_{17}X_1X_6 + b_{18}X_2X_3 + b_{19}X_2X_4 + b_{20}X_2X_5 + b_{21}X_2X_6 + b_{22}X_3X_4 + b_{23}X_3X_5 + b_{24}X_3X_6 + b_{25}X_4X_5 + b_{26}X_4X_6 + b_{27}X_5X_6.$$

Вычисление коэффициентов регрессии для принятых функций отклика осуществлялось по формулам [7]. Полученные значения коэффициентов уравнений регрессии приведены в табл. 4.

В табл. 5 отражены результаты оценки адекватности и работоспособности полученных уравнений регрессии.

Таблица 4

Значения коэффициентов уравнений регрессии  
Regression equation coefficients

Коэффициент уравнения регрессии	Функция отклика для расчета				
	теплового потока к воздуху $Y_i = f(X)_i = 1, 2, 3, 4, \text{Вт/м}^2$				потерь напора $Y_5, \text{Па/м}$
	Суммарный поток $Y_1$	От ПСВ $Y_2$	От ОСВ $Y_3$	От грунта $Y_4$	
1	2	3	4	5	6
$b_0$	32,400	29,30000	16,600000	37,400	0,133000
$b_1$	-1,380	-0,31000	-0,212000	-0,890	-0,002900
$b_2$	0,610	-0,07600	-0,055400	0,192	0,000553
$b_3$	-1,290	0,91000	0,525000	-2,220	-0,065000
$b_4$	0,770	-0,00161	-0,028100	0,411	0,012500
$b_5$	3,100	0,41800	0,297000	3,700	0,108000
$b_6$	-0,560	-0,17700	-0,170000	-1,580	0,019000
$b_7$	1,030	3,55000	1,180000	-0,068	-0,000131
$b_8$	0,536	0,13800	-0,000411	0,166	0,001160
$b_9$	-11,600	-1,92000	-1,890000	-16,600	-0,004380
$b_{10}$	0,600	0,09600	0,037900	0,273	0,001660
$b_{11}$	2,970	-0,02170	-0,019600	4,660	0,000114
$b_{12}$	0,610	0,09800	0,039200	0,163	0,001050
$b_{13}$	-0,352	-0,29400	-0,153000	0,280	-0,001350
$b_{14}$	0,650	0,01970	0,020800	0,178	-0,002530

Окончание табл. 4  
End of Table 4

1	2	3	4	5	6
$b_{15}$	-0,0790	-0,07100	-0,01650	-0,0112	-1,32E-05
$b_{16}$	0,6100	0,03240	0,03990	0,2850	0,0000191
$b_{17}$	-0,1820	-0,00525	-0,00830	-0,0860	-0,0000170
$b_{18}$	0,4570	0,000078	-0,01200	-0,5770	-0,0650000
$b_{19}$	0,0930	0,10300	0,04550	0,0274	-0,0000590
$b_{20}$	0,0780	-0,12800	-0,10700	1,6900	0,0024200
$b_{21}$	-0,0800	0,00950	0,00970	-0,4820	-5,35E-05
$b_{22}$	0,0590	0,02670	0,00980	0,0081	0,0000332
$b_{23}$	-1,1600	-0,02640	-0,03020	-1,1700	-0,0029200
$b_{24}$	0,3280	0,00358	0,00630	0,3420	0,0000577
$b_{25}$	0,0568	-0,02180	-0,00129	-0,0169	0,0000133
$b_{26}$	-0,2220	0,01010	0,01140	0,0710	0,0000790
$b_{27}$	-0,0228	-0,00307	-0,00083	-0,0270	0,0000236

Таблица 5

**Оценка адекватности и работоспособности уравнений регрессии**  
Assessment of adequacy and performance of regression equations

Функция отклика	Статистическая характеристика					Оценка уравнения регрессии
	Дисперсия		Критерий			
	$S_y^2$	$S_{ост}^2$	$F$	$F_T$	$R^2$	
$Y_1$	177,9300	54,6600	3,26	2,3423	0,877	Адекватно и работоспособно
$Y_2$	17,2900	0,8800	19,67	2,3423	0,980	
$Y_3$	5,3800	0,3200	16,75	2,3423	0,976	
$Y_4$	321,9500	21,0500	15,30	2,3423	0,974	
$Y_5$	0,0220	0,0082	2,70	2,3423	0,852	

Условие  $F > F_T$  выполняется. Это означает, что уравнение регрессии описывает результаты эксперимента в  $F_T$  раз лучше модели среднего. Регрессионная модель адекватна. Коэффициент детерминации  $R^2 > 0,75$ , т. е. полученная модель работоспособна.

Переход к размерным характеристикам осуществлялся по известным соотношениям, приведенным, например, в [5]:

– для свободного члена:

$$\delta_0 = b_0 - \sum_{i=1}^6 b_i \frac{c_i}{\varepsilon_i} + \sum_{i=1, j=1}^6 \frac{b_{ij} c_i c_j}{\varepsilon_i \varepsilon_j}; \quad (4)$$

– для коэффициентов линейных членов

$$\delta_i = \frac{b_i}{\varepsilon_i} - 2b_{ii} \frac{c_i}{\varepsilon_i^2} - \sum_{i=1, j=1}^6 \frac{b_{ij} c_j}{\varepsilon_i \varepsilon_j}; \quad (5)$$

– для коэффициентов нелинейных членов

$$\delta_{ij} = \frac{b_{ij}}{\varepsilon_i \varepsilon_j}, \quad (6)$$

где  $b_0, b_i, b_{ii}, b_{ij}$  – коэффициенты уравнения регрессии (табл. 4);  $i$  – номер фактора;  $j$  – индекс коэффициента,  $1 \leq i \leq j \leq 6$ ;  $c_i, c_j$  – натуральные значения фактора на нулевом уровне;  $\varepsilon_i$  – натуральное значение интервала варьирования фактора.

Результаты расчета значений размерных коэффициентов регрессионных уравнений будут показаны во второй части статьи.

Значимость коэффициентов полученных уравнений регрессии подтверждалась после проверки с использованием  $t$ -критерия Стьюдента [7]. Для наглядности построены карты Парето (рис. 5–7), показывающие значимость коэффициентов уравнений регрессии.



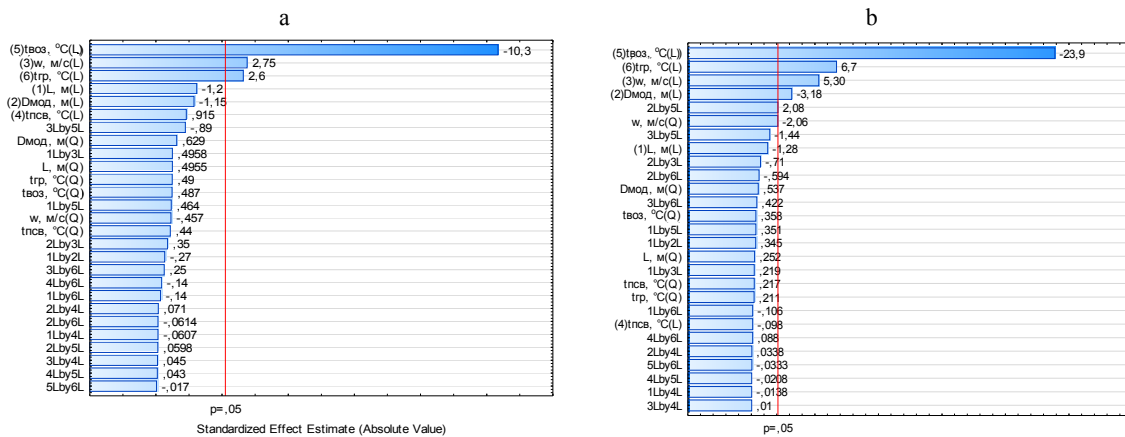


Рис. 5. Карта Парето значимости коэффициентов регрессии для уравнения: а – суммарного потока теплоты  $Y_1$ ; б – удельного потока теплоты от грунта  $Y_4$

Fig. 5. Pareto map of regression coefficient significance for equation: а – total heat flow  $Y_1$ ; б – specific heat flow from soil  $Y_4$

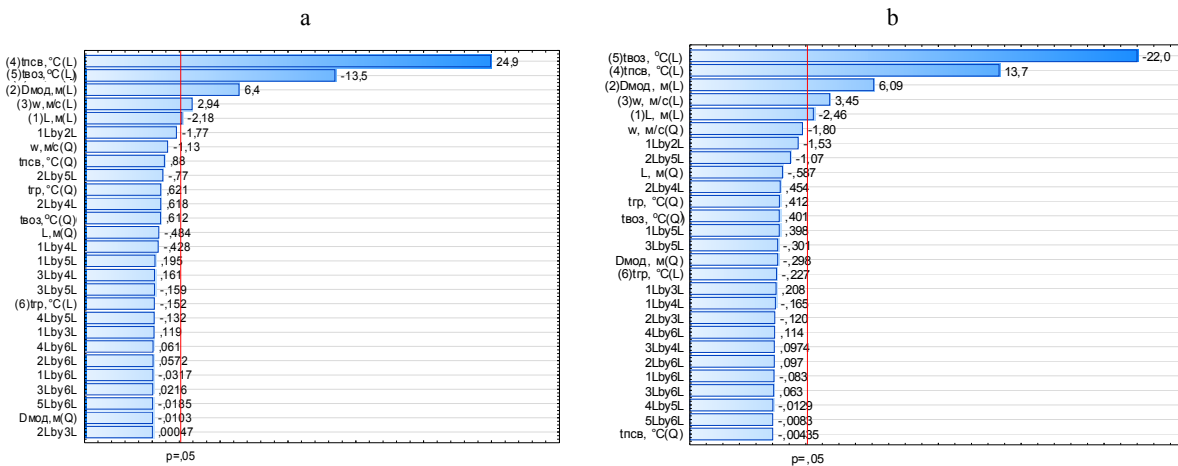


Рис. 6. Карта Парето значимости коэффициентов регрессии для удельного потока теплоты: а – от прямой сетевой воды  $Y_2$ ; б – от обратной сетевой воды  $Y_3$

Fig. 6. Pareto map of regression coefficient significance for specific heat flow: а – from direct network water  $Y_2$ ; б – from return network water  $Y_3$

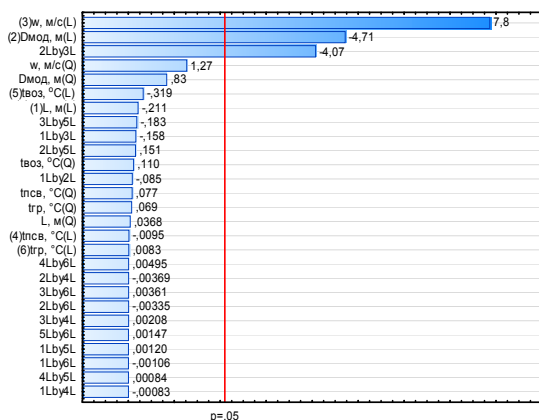


Рис. 7. Карта Парето значимости коэффициентов регрессии для уравнения удельных потерь напора  $Y_5$

Fig. 7. Pareto map of regression coefficient significance for equation of specific pressure losses  $Y_5$

Красной линией на рис. 5–7 обозначен критический уровень  $p$ -значения, соответствующий  $p = 0,05$ , который принимается во многих областях исследований. Таким образом,  $p$ -значение 0,05 здесь рассматривается как «граничный приемлемый» уровень ошибки. Вместе с тем известно, что в математических экспериментах, имеющих место в рассматриваемом случае, не следует игнорировать менее значимые коэффициенты регрессионных зависимостей [7].

Согласно анализу полученных значений карт Парето и функций отклика, можно отметить следующее:

– аэродинамическое сопротивление проходу потока воздуха участков канала находится в

диапазоне до 4,6 Па/м, что хорошо соотносится с имеющимися данными [14]. Наибольшее влияние на потери напора оказывают, как и следует ожидать, скорость потока и длина участка;

– удельная теплоотдача от поверхности трубопроводов сетевой воды к потоку воздуха имеет значение до 0,04 кВт/м<sup>2</sup>, что отвечает данным [15]. Наиболее значимые факторы – температуры потоков и характерный размер поперечного сечения;

– удельная теплоотдача от стенок канала к воздуху оценивается величиной 0,08 кВт/м<sup>2</sup>, что соответствует данным по теплообмену в грунтовых скважинах и каналах [16]. Наиболее значимые факторы – температуры потоков, скорость воздуха, характерный размер поперечного сечения;

– мощность суммарных удельных на единицу площади омываемых воздухом поверхностей потока теплоты к воздуху 0,06 кВт/м<sup>2</sup>. Наибольшее воздействие на удельный тепловой поток к воздуху оказывают скорость и температура воздуха в канале, а также температура грунта. Геометрические характеристики канала менее значимы. При этом длина канала более воздействует на удельный тепловой поток на единицу площади, что можно объяснить с позиций теплоотдачи при продольном омывании поверхностей. Температура сетевой воды оказывает наименьшее значение, и это связано с наличием изоляции трубопроводов, которая нивелирует изменение температуры наружной поверхности изоляции теплотрасс при изменении температуры сетевой воды в них. Погрешность расчетов удельных потоков теплоты с помощью полученных регрессионных соотношений находится в пределах 20–30 %;

## ВЫВОДЫ

1. На базе программного комплекса ANSYS проведено численное исследование с применением методов планирования активного эксперимента.

2. Получены регрессионные зависимости для безразмерных факторов, позволяющие оп-

ределить тепловые потоки от поверхностей, омываемых потоком воздуха, к названному потоку. Подтверждена их адекватность общепринятыми статистическими методами.

3. Осуществлен переход к регрессионным соотношениям для значимых факторов, и с помощью карт Парето выявлены значимые коэффициенты. Показано соответствие их значимости физическим представлениям о протекающих процессах.

4. Верификация результатов определила пригодность регрессионных соотношений для практического применения.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Седнин, В. А. Системы регенеративно-утилизационного теплоиспользования для теплотрасс в непроходных каналах / В. А. Седнин, Т. В. Бубырь // Энергия и Менеджмент. 2017. Т. 97, № 4. С. 2–6.
2. Седнин, В. А. Численное исследование сложного теплообмена в продуваемых в 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. Таблицы планов эксперимента для факторных и полиномиальных моделей / В. З. Бродский и [др.]. М.: Металлургия, 1982. 752 с.
4. Халафян, А. А. Промышленная статистика. Контроль качества, анализ процессов, планирование экспериментов в пакете STATISTICA / А. А. Халафян. М.: Либроком, 2013. 384 с.
5. Тихомиров, В. Б. Планирование и анализ эксперимента (при проведении исследований в легкой и текстильной промышленности) / В. Б. Тихомиров. М.: Легкая индустрия, 1974. 262 с.
6. Шестаков, В. Н. Планирование эксперимента в оптимизационных задачах технической мелиорации грунтов / В. Н. Шестаков. Омск: Изд-во «СибАДИ», 2007. 95 с.
7. Тарасик, В. П. Математическое моделирование технических систем / В. П. Тарасик. Минск: Новое знание, 2013. 584 с.
8. ANSYS ICEM CFD [Электронный ресурс] // ГК «ПЛИМ Урал». Режим доступа: <https://cae-expert.ru/product/ansys-icem-cfd>. Дата доступа: 24.02.2018.
9. ANSYS Fluent Meshing [Электронный ресурс] // ГК «ПЛИМ Урал». Режим доступа: <https://cae-expert.ru/product/ansys-fluent-meshing>. Дата доступа: 24.02.2018.
10. ANSYS Meshing [Электронный ресурс] // ГК «ПЛИМ Урал». Режим доступа: <https://cae-expert.ru/product/ansys-meshing>. Дата доступа: 24.02.2018.

11. ANSYS CFX [Электронный ресурс] // ГК «ПЛИМ Урал». Режим доступа: <https://cae-expert.ru/product/ansys-cfx>. Дата доступа: 24.02.2018.
12. Обзор STATISTICA [Электронный ресурс] // StatSoft Russia. Режим доступа: <http://statsoft.ru/products/overview/>. Дата доступа: 21.01.2018.
13. Боровиков, В. П. Популярное введение в современный анализ данных в системе STATISTICA / В. П. Боровиков. М.: Горячая линия-Телеком, 2013. 288 с.
14. 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.
15. Справочник по наладке и эксплуатации водяных тепловых сетей / В. И. Манюк [и др.]; 3-е изд., перераб. и доп. М.: Стройиздат, 1988. 432 с.
16. 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 24.12.2020

Подписана в печать 25.02.2021

Опубликована онлайн 30.03.2021

#### REFERENCES

1. Sednin V. A., Bubyg 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., Bubyg 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. Brodskii V. Z., Brodskii L. I., Golikova T. I., Nikitina E. P., Panchenko L. A. (1982) *Experiment Design Tables for Factorial and Polynomial Models*. Moscow, Metallugiya Publ. 752 (in Russian).
4. Khalafyan A. A. (2013) *Industrial Statistics. Quality Control, Process Analysis, Experimental Planning in the*

- STATISTICA Package*. Moscow, Librokom Publ. 384 (in Russian).
5. Tikhomirov V. B. (1974) *Planning and Analysis of Experiment (when Conducting Research in Light and Textile Industries)*. Moscow, Liogkaya Industriya. 262 (in Russian).
6. 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).
7. Tarasik V. P. (2013) *Mathematical Modeling of Technical Systems*. Minsk, Novoe Znanie Publ. 584 (in Russian).
8. ANSYS ICEM CFD. Available at: <https://cae-expert.ru/product/ansys-icem-cfd> (Accessed 24 February 2018) (in Russian).
9. ANSYS Fluent Meshing. Available at: <https://cae-expert.ru/product/ansys-fluent-meshing> (Accessed 24 February 2018) (in Russian).
10. ANSYS Meshing. Available at: <https://cae-expert.ru/product/ansys-meshing> (Accessed 24 February 2018) (in Russian).
11. ANSYS CFX. Available at: <https://cae-expert.ru/product/ansys-cfx> (Accessed 24 February 2018) (in Russian).
12. STATISTICA. StatSoft Russia. Available at: <http://statsoft.ru/products/overview/> (Accessed 21 January 2018) (in Russian).
13. Borovikov V. P. (2013) *Popular Introduction to Modern Data Analysis with STATISTICA System*. Moscow, Goryachaya Liniya-Telekom Publ. 288 (in Russian).
14. 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).
15. 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*. 3<sup>rd</sup> ed. Moscow, Stroyizdat Publ. 432 (in Russian).
16. 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: 24.12.2020

Accepted: 25.02.2021

Published online: 30.03.2021