

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-1-61-76>

УДК 697.343

Численное исследование сложного теплообмена в продуваемых непроходных каналах теплотрасс

В. А. Седнин¹⁾, Т. В. Бубырь¹⁾

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

© Белорусский национальный технический университет, 2019

Belarusian National Technical University, 2019

Реферат. Для решения задачи повышения эффективности эксплуатации тепловых сетей, размещенных в непроходных каналах, ранее авторами предлагалось схемно-структурное решение регенеративно-утилизационного теплоиспользования. Представлена принудительная вентиляция канала наружным воздухом с последующим охлаждением воздуха и утилизацией отводимой теплоты. Определяющим для реализации данной технологии повышения эффективности эксплуатации рассматриваемых теплопроводов является исследование процессов теплообмена между потоком воздуха и трубопроводами сетевой воды, с одной стороны, и между потоком воздуха и стенками канала, с другой. Конвективный теплообмен с перечисленными составляющими конструкции канала достаточно сложно привести к той или иной канонической форме, позволяющей использовать имеющиеся расчетные зависимости. Несомненно сложнее найти решение при совместном рассмотрении протекающих процессов вынужденной конвекции. Теплообмен протекает в канале сложной формы, определяемой по длине канала наличием опор, компенсаторов и поворотов. В поперечном сечении размеры конструкции и стеснение потока воздуха определяются типоразмерным рядом диаметров трубопроводов сетевой воды. В этих условиях использование какой-либо реальной экспериментальной установки связано с неприемлемой идеализацией и соответствующей погрешностью, непригодной для практического применения. Натурные испытания могут рассматриваться только для проверки адекватности экспериментальных результатов. Выходом из этой ситуации может стать обращение к виртуальной экспериментальной установке, создаваемой на базе стандартного программного комплекса (в данном случае используется ANSYS). Рассмотрены подходы к созданию виртуальной экспериментальной установки для исследования теплообмена и аэродинамики в продуваемых непроходных каналах теплотрасс и методики проведения эксперимента с применением теории его планирования.

Ключевые слова: продуваемые непроходные каналы, конвективный теплообмен, теплотрасса, виртуальная экспериментальная установка, ANSYS

Для цитирования: Седнин, В. А. Численное исследование сложного теплообмена 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>

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

Numerical Study of Complex Heat Transfer in Blown Impassable Channels of Heating Mains

V. A. Sednin¹⁾, T. V. Bubyr¹⁾

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

Abstract. To solve the problem of increasing the efficiency of operation of thermal networks, placed in impassable channels, the authors previously proposed the scheme-and-structural decision of the regenerative-utilization heat consumption. The technology of forced ventilation of the channel by external followed by the cooling of air and utilization of the withdrawn heat is presented. Research of processes of heat exchange between a stream of air and pipelines of network water on the one hand and between a stream of air and walls of the channel on another hand is a determinant for realization of the presented technology of increase of efficiency of operation of the considered heating mains. Convective heat transfer with the listed components of the channel structure is quite difficult to reduce to any canonical form which makes it possible to use the available design dependences. It is immeasurably more difficult to find a solution when considering the processes of forced convection jointly. Heat exchange takes place in a channel of complex shape that is determined by the presence of supports, compensators and turns along the length of the channel. In the cross section, the sizes of the structure and the restriction of the air flow are determined by a standard size range of diameters of the network water pipelines. Under these conditions, the use of any real experimental facility is associated with unacceptable idealization and the corresponding error, unsuitable for practical use. Full-scale tests can be considered only to verify the adequacy of the experimental results. The way out of this situation can be a usage of a virtual experimental facility created on the basis of a standard software package (in the case under consideration the ANSYS was used). The approaches of creating a virtual experimental facility for the study of heat transfer and aerodynamics in the blown impassable channels of heating mains and methods of conducting experiment using the theory of its planning are considered.

Keywords: blown impassable channels, convective heat transfer, heating main, virtual experimental facility, ANSYS

For citation: Sednin V. A., Bubyr T. V. (2019) Numerical Study of Complex Heat Transfer in Blown Impassable Channels of Heating Mains. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 62 (1), 61–76. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-1-61-76> (in Russian)

Введение

Несмотря на современную тенденцию применения бесканальной прокладки теплопроводов, теплотрассы в непроходных каналах имеют достаточно большой удельный вес (около 50 %) в существующих системах централизованного теплоснабжения Беларуси. Учитывая высокую стоимость изготовления и прокладки теплопроводов, их полная замена с применением инновационных технологий в городах республики займет еще не одно десятилетие. Поэтому остаются актуальными разработка и исследование технологий повышения энергоэффективности эксплуатации теплопроводов в непроходных каналах. Востребованность подобных технологий определило появление ряда работ, непосредственно связанных с рассматриваемым исследованием [1–3]. Главным этапом разработки технологии, представленной в [1], является изучение теплообмена внутри канала между его конструкциями и потоком воздуха, продуваемого через канал. Характерные геометрические особенности объекта исследования представлены на рис. 1.

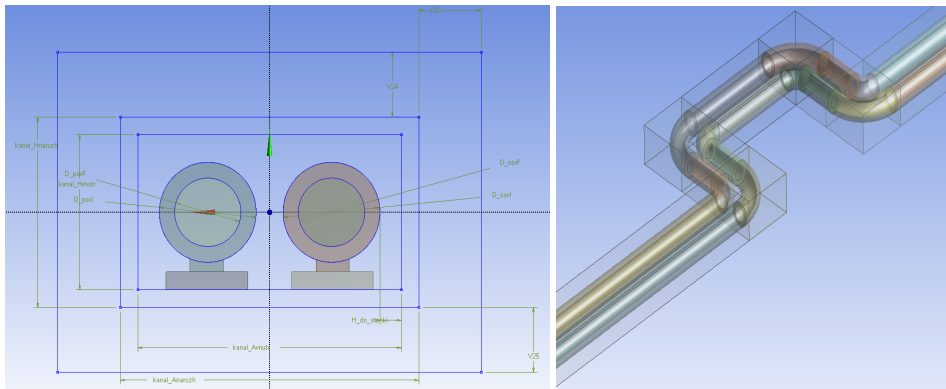


Рис. 1. Характерные геометрические особенности канала и теплопроводов

Fig. 1. Characteristic geometric features of the channel and heating mains

Значительная протяженность тепловых сетей делает перспективным использование теплоты грунта для повышения энергосбережения в системах централизованного теплоснабжения. При этом затраты, связанные с созданием соответствующей технической системы, оказываются несоизмеримо меньшими, чем в случае использования тепловой энергии грунта с помощью вертикальных или горизонтальных скважин, традиционно рассматриваемых в этих случаях. Прежде всего потому, что не требуется изымать из оборота большие площади для создания полей с подобными скважинами, которые в городских условиях из-за дороговизны земли делают проекты экономически нецелесообразными. Существенным ограничением, которое необходимо учитывать при использовании непроходных каналов в качестве устройств утилизации теплоты грунта, является выполнение нормативных требований в отношении расстояния между конструкциями тепловых сетей и существующими конструкциями других систем инфраструктуры города для исключения механических воздействий на конструкцию, вспучивания грунта при замораживании и др. Кроме того, темп изменения температур конструкции внутри канала должен соответствовать сохранению его долговечности.

Принципиальная схема непроходного канала теплотрассы с указанием основных материальных и тепловых потоков при прокачке воздуха показана на рис. 2. Исследование процессов аэродинамики и теплообмена в подобных объектах, имеющее своей целью получение приемлемой достоверности результатов, требует принципиально новых подходов. Одним из них является вычислительный эксперимент на основе применения методов конечных разностей, конечных и граничных элементов [4–8]. Универсальное решение – использование программного комплекса ANSYS, наиболее удобного из САЕ-систем, предназначенных для компьютерного моделирования и анализа различных физических процессов, в рамках которого удобно построить виртуальную экспериментальную установку.

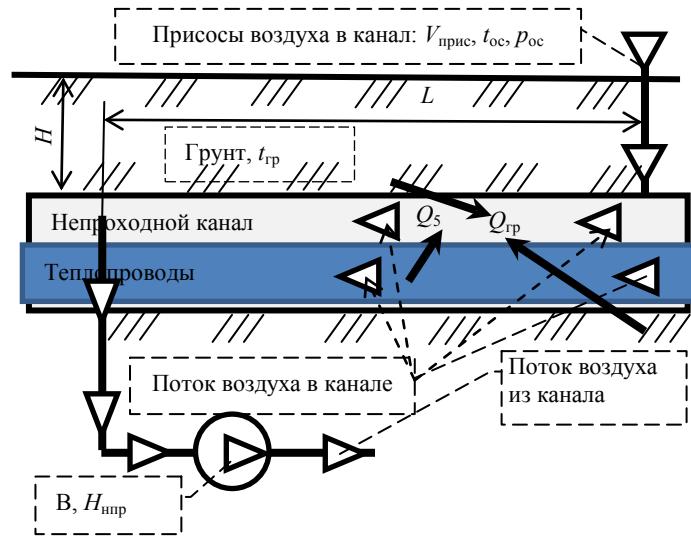


Рис. 2. Принципиальная схема тепловых потоков в продуваемом непроходном канале: H – заглубление канала, м; L – длина вентилируемого участка, м; B – вентилятор; $Q_5, Q_{гр}$ – поток рассеяния тепловой энергии трубопроводами сетевой воды и поток теплового взаимодействия со стенками канала, кДж/ч; $V_{прис}$ – расход воздуха, прокачиваемого на участке L канала, m^3/h ; $t_{ос}, t_{гр}$ – температура окружающего наружного воздуха и стенок канала, $^{\circ}C$; $p_{ос}$ – давление окружающей среды, кПа; $H_{нпр}$ – напор, обеспечиваемый вентилятором, кПа

Fig. 2. Schematic diagram of heat fluxes in ventilated impassable channel: H – depth of channel, m; L – length of ventilated area, m; B – ventilator; $Q_5, Q_{гр}$ – flux of scattering of thermal energy by network water pipelines and the flux of the thermal interaction with the walls of the channel, kJ/h; $V_{прис}$ – air flow that is pumped at the site L of the channel, m^3/h ; $t_{ос}, t_{гр}$ – temperature of ambient outdoor air and the walls of the channel, $^{\circ}C$; $p_{ос}$ – ambient pressure, kPa; $H_{нпр}$ – pressure delivered by the ventilator, kPa

Достоинством инструментариев ANSYS является то, что они позволяют связывать и объединять различные приложения для расчета задач механики твердого тела, гидро- и газодинамики, теплообмена и электромагнетизма. С помощью программного комплекса ANSYS можно проводить численный анализ всего многообразия задач сплошных сред. Он предоставляет широкие возможности для подготовки геометрических и сеточных моделей с последующей обработкой результатов расчета. Программный комплекс ANSYS основан на эффективных алгоритмах, позволяющих существенно сократить время расчета ресурсоемких задач.

Описание экспериментальной виртуальной установки

Рабочая расчетная область модели, объединяющая канал и массив грунта вокруг него, приведена на рис. 3. Показана расчетная сетка в поперечном сечении и на фрагменте продольного сечения канала, в основе которой лежат конечные элементы, представленные каноническими формами: тетраэдрами, пирамидами, призмами, шестигранниками. Большая часть элементов была построена шестигранниками для получения структурированной сетки.

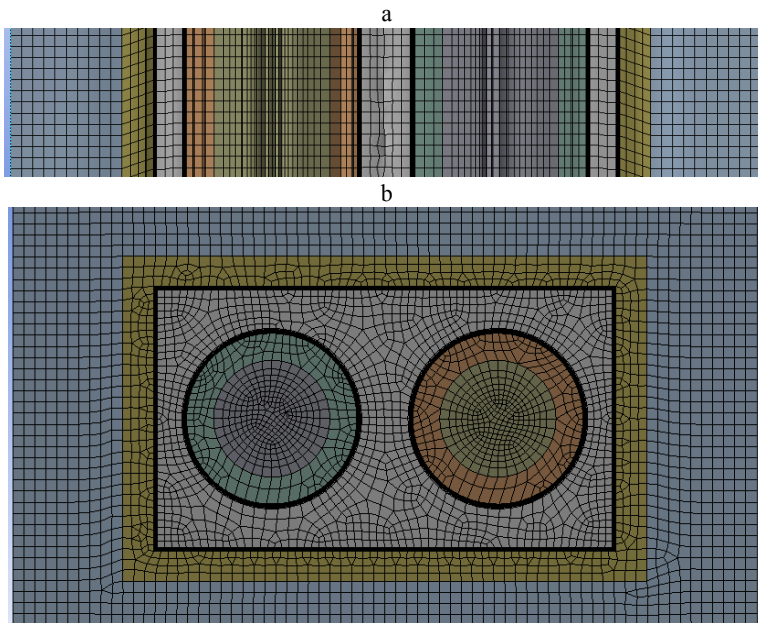


Рис. 3. Общий вид расчетной сетки, фрагменты сечения канала:
а – продольного; б – поперечного

Fig. 3. General view of the computational grid, fragments of the channel section:
a – longitudinal; b – transverse

Безусловным требованием, определяющим максимальный размер элемента и его каноническую форму, является выполнение сходимости процесса численного решения. Важный фактор построения сетки – соответствие канонической формы элементов разбиения сложности конструкции канала. Другое условие – обеспечение требуемой точности решения. Общее число элементов в модели колеблется от 5 до 15 млн ед. Достаточно большое количество элементов связано как с максимальной длиной участка (100 м), так и с максимальным поперечным сечением канала (лотка) (1,7×2,5 м). Кроме того, расчетное сечение включает грунт вокруг канала (на 0,5 м). При этом минимальная длина канала 20 м; размеры сечения 1,5×2,0 м. Вблизи поверхностей рассматриваемой геометрии укладывался тонкий слой призматических элементов толщиной, обеспечивающей безразмерный параметр y^+ , учитывающий структуру пограничного слоя. Величину указанного параметра рекомендуется принимать в диапазоне 30–100 [4]. Меньшее значение не допускается, поскольку пристенные функции, используемые в решателе ANSYS, дадут неверный результат. Значения, близкие к верхней границе диапазона, требуют меньших ресурсов, но приводят к снижению точности решения. В расчетах принята величина y^+ , равная 50. Сходимость процесса определялась по достижении совпадения соседних значений итераций величин температуры, напора, массового расхода, характеризующихся величиной менее 10^{-3} , что достигалось после 2000 итераций. Для решения использовался компьютер с 26 ядрами и 128 Гбайт ОЗУ. Геометрические размеры конструкций тепловых сетей определялись по действующим нормативным документам [9, 10].

В соответствии с описанными условиями расчеты с помощью программного комплекса ANSYS позволили получить следующие поля распределения скоростей, давления (рис. 4) и температуры (рис. 5) для тестовых экспериментов.

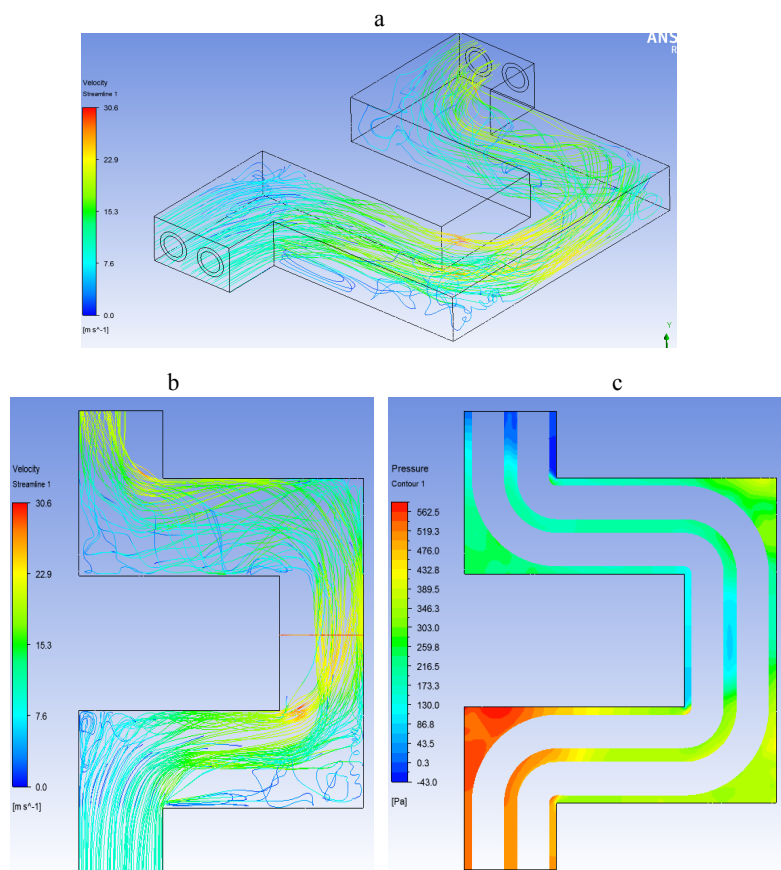


Рис. 4. Линии тока (а) и распределение скорости (б) и давления (с) в канале
 Fig. 4. Current lines (a) and velocity (b) and pressure distribution (c) in the channel

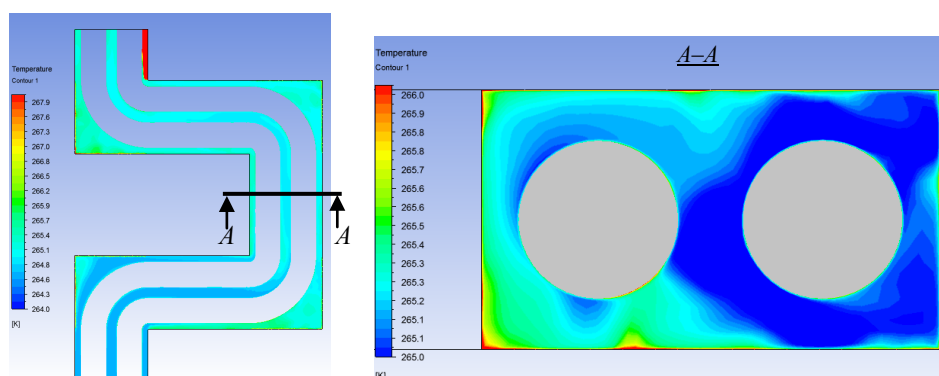


Рис. 5. Распределение температуры внутри канала
 Fig. 5. Temperature distribution inside the channel

Анализ процессов теплопереноса, имеющих место при продувке канала воздухом

Массив грунта вокруг канала можно рассматривать как тепловой аккумулятор, а канал – как теплообменник, находящийся внутри аккумулятора. Здесь следует отметить, что сооружение подобного теплообменника не требует никаких дополнительных капитальных затрат, поскольку уже существует по факту. Очевидно, что температурное поле грунта в этом случае является нестационарным, при этом амплитуда изменения температуры быстро затухает по мере удаления от канала, а протяженность слоя, где имеет место упомянутое затухание, зависит от временного промежутка наблюдения. Для отрезков времени в пределах «месяц – сезон» величина слоя соответствует 1,0–2,0 м, для суточного отрезка она составляет не более 0,5 м [11]. В этом случае в течение суток можно рассматривать теплообмен при протекающих граничных условиях первого рода и принимать температуру грунта на удалении 0,5 м от стенки канала постоянной в диапазоне (7–13) °С. Многочисленные данные по температурам грунта, принимаемые в расчет при выборе грунтовых теплонасосных установок, весьма разнородны, что объясняется, с одной стороны, статистическим характером изменения свойств грунта, с другой – эпизодическим характером наблюдений [11]. В этом контексте и в связи с необходимостью учета изменений, оговоренных выше в отношении теплообмена по длине канала, наиболее взвешенным представляется решение об использовании температуры грунта с учетом времени года и глубины канала на базе средних статистических данных (рис. 6).

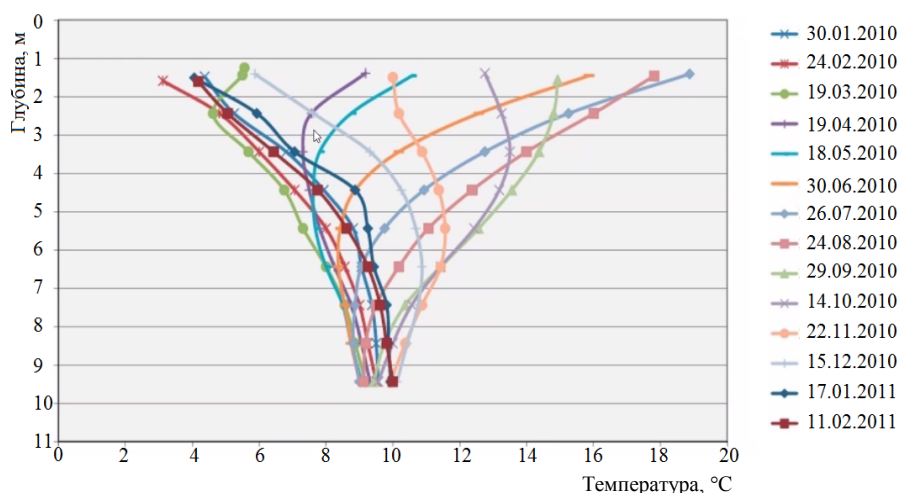


Рис. 6. Изменение температуры по глубине грунта в течение года

Fig. 6. Temperature change according to the depth of soil during a year

Приведенный выше диапазон температуры (7–13) °С соответствует обобщенным данным по глубинам расположения каналов и температуры грунтов на соответствующих глубинах. В пределах суток температурное

поле в грунте такого теплообменника можно считать постоянным, а его изменение во времени имеет место при переходе к следующим суткам.

Температуру грунта за пределами рассматриваемой зоны с учетом случайного ее изменения во времени и пространстве можно принимать согласно рекомендациям для выбранного региона [12]. Это позволяет упростить постановку задачи в целом, свести ее к стационарной, метрически трехмерной с коэффициентами, зависящими от определяющих температур.

Учитывая сложность задачи, решено провести численное исследование с применением методов математического планирования эксперимента, что позволяет снизить затраты на его проведение, с одной стороны, и привести полученные в ходе исследования результаты к виду, удобному для использования в инженерной практике, с другой.

Определение функций откликов, факторов и выбор плана проведения эксперимента

В соответствии с ранее поставленными задачами исследования в качестве функций откликов были приняты:

- абсолютная (Вт) и удельная (Вт/м) мощность интегрального потока теплоты для процессов теплопереноса, протекающих между потоком воздуха с трубопроводами сетевой воды и с грунтом через ограждающие конструкции канала;

- абсолютная (Вт) и удельная (Вт/м) мощность потока теплоты, рассеиваемой трубопроводами сетевой воды;

- абсолютная (Вт) и удельная (Вт/м) мощность потока теплоты процесса теплопереноса между грунтом, прилегающим к каналу, и воздухом, протекающим внутри канала;

- потери напора (Па) при движении потока воздуха внутри канала (являются одним из результатов работы программного комплекса ANSYS (рис. 4с)).

Мощность потоков теплоты определяется по выражению

$$Q = G \left(\overline{c_p} \Big|_0^{t_2} \cdot t_2 - \overline{c_p} \Big|_0^{t_1} \cdot t_1 \right), \quad (1)$$

где G – массовый расход теплоносителя, кг/с; $\overline{c_p} \Big|_0^t$ – изобарная удельная массовая средняя теплоемкость потока в интервале $0-t$, кДж/(кг·К): для потока воды (жидкая фаза) $c_p = 4,2$ кДж/(кг·К); t_1, t_2 – температура на входе и выходе исследуемого участка, °С.

Выбор факторов во многом определяют особенности экспериментальной установки, в том числе и виртуальной. Характеристики установки (аэродинамика и теплообмен) определяются в соответствии с условиями, имеющими место в действительности. На основании проведенного анализа исследуемых процессов в качестве набора параметров можно выделить следующие факторы, из которых далее необходимо выбрать значимые для исследования:

- характерный размер, определяющий геометрию канала в поперечном сечении $x_{\text{попр}}$, м;
- характерный размер, определяющий геометрию канала в продольном сечении $x_{\text{прод}}$, м;
- скорость потока воздуха в канале w , м/с;
- скорость сетевой воды w , м/с;
- температуру прямой $t_{\text{псв}}$ и обратной $t_{\text{осв}}$ сетевой воды, °С;
- температуру наружного воздуха $t_{\text{н.в.}}$, °С;
- температуру грунта на глубине залегания канала $t_{\text{гр}}$, °С.

Параметры геометрии канала. Прежде чем обратиться к непосредственному рассмотрению геометрии поперечного сечения канала с целью определения характерного размера, связанного с потоком воздуха в канале, отметим необходимость построения сетки конечных элементов пакета ANSYS, в том числе и непосредственно в ограждающей конструкции канала (бетонные стенки), и в прилегающем к каналу слое грунта, толщина которого доходит до 0,5 м [11]. С учетом этого слоя рассматривается геометрия поперечного сечения модели, необходимая для построения расчетной сетки.

Характерный размер сечения канала для прохода воздуха в контексте использования методов планирования эксперимента должен быть адаптирован к требованиям факторного анализа. Прежде всего его значения должны соответствовать реальным каналам, но и в расчетах величина характерного размера должна отвечать требованиям (управляемости и однозначности), устанавливаемым матрицей планирования эксперимента [13–17].

Для расчета характерного размера принимается сечение, свободное от опор трубопроводов (рис. 2, 3). Это оправдано, несмотря на то обстоятельство, что по факту имеет место достаточно частое расположение опор в непроходных каналах. Однако размеры аэродинамического следа [18, 19] за опорой и соответствующей зоной перед ней невелики и протяженность участков свободного течения доминирует, что позволяет считать выбранное сечение для расчета характерного размера поперечного сечения канала более взвешенным. В соответствии с его геометрией для характерного размера использовано известное соотношение для эквивалентного диаметра

$$x_{\text{попр}} = d_{\text{экв}} = 4F/P, \quad (2)$$

где F – живое сечение канала для прохода воздуха, $F = ab - \pi d^2/2$, м²; P – смоченный периметр канал, $P = 2(a + b + \pi d_{\text{из}})$, м; a , b – ширина и высота канала, м; $d_{\text{из}}$ – диаметр изолированного теплопровода по наружной образующей изоляции, м.

Для большей однозначности идентификации канала с помощью характерного размера проведена модификация последнего, исключившая ситуацию, когда несколько разных геометрий поперечного сечения могут иметь одинаковую величину $d_{\text{экв}}$, рассчитываемую по (2). Для этого введены поправки на стесненность потока в поперечном сечении по ширине и высоте канала в виде множителей $b/d_{\text{из}}$ и $a/d_{\text{из}}$. В результате получено соотношение

для характерного размера, определяющего геометрию канала в поперечном сечении:

$$x_{\text{попр}} = d_{\text{экв, мод}} = (b/d_{\text{из}})(a/d_{\text{из}})d_{\text{экв}}. \quad (3)$$

Таким образом, при проведении численного эксперимента устанавливаются абсолютные значения геометрических характеристик поперечного сечения непроходного канала с двухтрубной прокладкой трубопроводов сетевой воды, исходя из гаммы стандартных наборов геометрий поперечного сечения модифицированных характерных размеров, согласно (3). Соответствующие абсолютные значения модифицированных характерных размеров приведены в табл. 1.

Таблица 1

Абсолютные значения характерного размера поперечного сечения непроходного канала с двухтрубной прокладкой трубопроводов сетевой воды

Absolute values of the characteristic cross-sectional size of the impassible channel with two-pipe laying of network water pipelines

Эквивалентный диаметр канала для прохода потока воздуха, м	Поперечное сечение канала размерами, мм	Условный диаметр труб сетевой воды, мм	Характерный размер поперечного сечения канала, м
0,416	1500×900	300	0,191
0,522	2100×1200	500	0,255
0,834	2400×1800	700	0,333

В качестве характерного размера, определяющего геометрию канала в продольном сечении $x_{\text{прод}}$, очевидно следует выбрать длину теплопровода L . В части оценки длины расчетного участка теплопровода надо учитывать ограничения, связанные с возможностями, имеющимися в распоряжении вычислительных систем, и ресурсами в широком смысле слова. В этом контексте следует принимать разумный компромисс в определении диапазона изменения длины исследуемого участка. С увеличением длины канала линейно растет число конечных элементов, лежащих в основе численной модели. В рассматриваемом случае число упомянутых элементов при длине участка 1 км превышает 50 млн, что требует колоссальных ресурсов, не реальных для имеющейся в распоряжении вычислительной техники. В этой связи необходимы ограничения по длине участков, поэтому максимальная расчетная длина моделируемого канала была принята 100 м. При дальнейшей обработке и обобщении полученных результатов полезно убедиться в возможности суперпозиции результатов расчетов сопряженных участков ограниченной длины (до 100 м) теплотрассы, а также в возможности расчетов на единицу длины теплотрассы, что позволит разработать универсальную методику расчетов для каналов требуемой протяженности.

Еще одним проблемным вопросом остается учет местных сопротивлений при движении воздуха вдоль канала. Геометрия канала связана с наличием поворотов, компенсаторов и пр. Безусловно, в дополнение к влиянию геометрии поперечного и продольного сечений канала теплотрассы необ-

ходимо оценить влияние местных сопротивлений, прежде всего, поворотов опор, поворотов и П-образных компенсаторов для разных скоростей потока воздуха и различных характерных размеров. В дальнейшем на базе полученных результатов численного эксперимента следует оценить возможность введения поправочных коэффициентов, учитывающих наличие, количество и влияние перечисленных местных сопротивлений на конечные значения искомых величин.

Скорости срод. Диапазон изменений скорости воздуха невелик, его нижняя граница должна быть увеличена по двум причинам. Прежде всего, небольшая скорость воздуха уменьшает возможность утилизации потоков теплоты, отводимой от грунта и наружного воздуха, что обосновывает повышение минимальной скорости. Одновременно возрастание рассматриваемой характеристики, сопровождаемое отмеченным уменьшением диапазона исследуемого фактора, повышает вероятность достижения адекватности получаемых уравнений регрессии, что приемлемо при выполнении требований практического использования. Верхняя граница диапазона определена из практического опыта, согласно которому при скорости потока воздуха более 10 м/с возникает недопустимый уровень шума. Таким образом, скорость потока воздуха в исследовании предполагается изменять в диапазоне от 0,5 до 10,0 м/с. Шаг изменений будет определяться выбранной матрицей планирования эксперимента.

Скорость потока сетевой воды может быть принята постоянной и равной 1,5 м/с – близкой к средней из диапазона 0,5–3,0 м/с, используемого в реальных условиях.

Температуры срод. Для проведения численного эксперимента требуется определять значения температур грунта на глубине канала и потока наружного воздуха, поступающего в канал, прямой и обратной воды в соответствии с выбранным планом эксперимента. Анализ картины теплообмена между грунтом и воздухом, описываемой ранее, указывает на необходимость соблюдения условия, что в летнее время (межотопительный период) температура грунта ниже температуры наружного воздуха, в отопительный период – выше. Матрица планов эксперимента в ряде точек определяет набор сочетания факторов, который нарушает указанную физическую картину. Устранение данного противоречия можно обеспечить ограничением рассматриваемого промежутка времени только отопительным периодом. В межотопительном периоде изменяется подход использования тепловых потоков за счет утилизации теплоты охлаждения наружного воздуха, что составляет предмет отдельного исследования. Для соблюдения требований сочетания факторов во всех точках плана матрицы планирования эксперимента первым фактором берется температура грунта, изменяемая в диапазоне используемых глубин 1,0–3,5 м, отнесенная к средней глубине канала. Изменения температуры грунта в зависимости от времени года в расчетах принимаются в соответствии с рис. 6. Температуры грунта на глубине 1,0 м, соответствующей верхней поверхности виртуальной модели, и на глубине 3,5 м, согласно размерам виртуальной модели с учетом колебаний и глубины залегания и размеров каналов, могут устанавливаться по той же диаграмме для обозначенных глубин грунта.

Во всех случаях значения температуры грунта принимаются для боковой поверхности на глубине 2,25 м и составляют диапазон от 7 до 13 °С.

Другим фактором, влияние которого следует изучить, является температура окружающего воздуха, которая для Беларуси изменяется от 8 °С (начало отопительного периода) до –24 °С (максимальная расчетная температура).

Температуры прямой и обратной сетевой воды, используемые в качестве факторов, принимаются в соответствии с температурным графиком системы теплоснабжения. В тестовых расчетах они задавались согласно температурным графикам сетевой воды для централизованной системы теплоснабжения г. Витебска. Температура прямой сетевой воды является фактором матрицы планирования эксперимента. Принимается, что температура обратной сетевой воды соответствует температуре прямой сетевой воды согласно температурному графику. Проведенные расчеты в среде ANSYS показали, что с изменением температуры прямой и обратной сетевой воды в максимальных границах в соответствии с графиком изменяется температура нагрева воздуха на величину, которой нельзя пренебречь: поток теплоты к воздуху и изменение его температуры варьируются в пределах 36–57 %, что соответствует изменению температурного напора процесса теплопередачи от сетевой воды к воздуху в канале.

Выбор плана проведения численного эксперимента и кодирование факторов

Выбор плана большей частью определяется интуицией и опытом экспериментатора [15]. Максимальная точность в нахождении коэффициентов уравнения регрессии достигается в случае использования планов полного факторного эксперимента (ПФЭ) [16]. Эти планы удачны для линейных моделей, применяемых при решении задач оптимизации [17]. В рассматриваемом случае модель, предположительно, нелинейная, и на данном этапе требуется лишь корректное описание значений функций отклика в исследуемой области. Эти обстоятельства продиктовали выбор шестифакторного ротатабельного центрального композиционного плана (РЦКП). План включает ПФЭ только в вершинах гиперкуба. В звездных точках величина плеча, определяемая числом факторов и типом плана, составляет 2,3784, при этом значение факторов в этих точках не должно выходить за границы установленного диапазона изменения факторов. В центральной точке плана имеются два повторения.

Окончательные итоги определения уровней и диапазонов изменения факторов сведены в табл. 2, где приведены натуральные значения интервала варьирования каждого фактора как разница между его величиной на границах диапазона и на нулевом уровне, деленная на плечо звездных точек. В итоге, как видно, в звездных точках значения факторов не выходят за границы диапазона.

Матрица шестифакторного РЦКП приведена в [20] и содержит 46 точек. В каждой точке спектра плана проводят только один опыт, в вычислительных экспериментах опыты выполняют в соответствии с матрицей

спектра плана, так как предполагается отсутствие систематических ошибок, поэтому нет необходимости в рандомизации опытов [21].

Таблица 2

Уровни варьирования факторов
Levels of factor variation

Уровень	Фактор							
	X_1	X_2			X_3	X_4	X_5	X_6
	$x_{\text{прод}} = L, \text{ м}$	$x_{\text{попр}} = d_{\text{экв, мод}}, \text{ м}$			$w, \text{ м/с}$	$t_{\text{псв}} (t_{\text{осв}}), \text{ }^\circ\text{C}$	$t_{\text{н.в.}}, \text{ }^\circ\text{C}$	$t_{\text{гр}}, \text{ }^\circ\text{C}$
	$a, \text{ м}$	$b, \text{ м}$	$d_{\text{изз}}, \text{ м}$					
-2,3784	20,0	0,093			0,50	65 (39)	-24,00	7,00
		1,00	0,46	0,266				
-1	43,2	0,191			3,25	79,5 (45)	-14,70	8,77
		1,50	0,90	0,557				
0	60,0	0,262			5,25	90 (49,5)	-8,00	10,00
		2,10	1,20	0,773				
1	76,8	0,333			7,25	100,5 (53)	-1,27	11,30
		2,40	1,80	0,928				
2,3784	100,0	0,43			10,00	115 (58)	8,00	13,10
		3,68	1,82	1,372				

Верификация модели

Верификация описанной модели на данном этапе выполнена на нулевом уровне. В требуемом объеме этот важнейший этап исследования будет выполняться постоянно далее по мере проведения расчетов согласно плану эксперимента. Следует отметить приемлемое соответствие результатов расчетов полученным значениям ручных прогонов и имеющимся в литературе данным о теплопотерях [9, 10, 22], потерях напора при продувке непроходных каналов [2], а также о тепловых режимах подземных коллекторов [3]. Наконец, анализ информации на рис. 4, 5, где показаны линии тока, распределение давления в канале и температуры внутри канала, указывает на их соответствие представлениям о протекающих физических процессах.

Так, согласно [10], расчетный коэффициент теплоотдачи от горизонтальных трубопроводов на открытом воздухе при скорости ветра 7 м/с составляет 22 Вт/(м²·°C). При продольном и поперечном омывании цилиндрических поверхностей с одинаковой скоростью интенсивность теплообмена выше в поперечном варианте. Из этого общеизвестного факта следует, что данные [10], где осреднены результаты набегания потока воздуха на трубопроводы под различными углами, в отношении величины коэффициента теплоотдачи должны превышать результаты расчета коэффициента теплоотдачи продольного омывания потоком воздуха теплопроводов сетевой воды в канале. Из результатов численных расчетов интенсивности теплоотдачи с помощью вышеописанной виртуальной экспериментальной модели получена величина коэффициента теплоотдачи 3,2 Вт/(м²·°C), что согласуется с изложенным представлением об их неизбежном несоответствии. Решение канонической задачи теплоотдачи при продольном протекании потока вдоль цилиндрического тела при тех же условиях дает вели-

чину коэффициента теплоотдачи $3,7 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С})$. Погрешность результатов расчета обоих вариантов составляет 15 %, и это достаточно хорошее совпадение. В рассматриваемой виртуальной установке имеют место отклонения от канонического продольного обтекания цилиндра, связанные с различными факторами (наличие двух параллельно расположенных труб, опор, обеспечивающих дополнительную турбулизацию потока). Это позволяет считать полученные результаты адекватными расчетам теплообмена с помощью программного пакета ANSYS в вышеописанной виртуальной экспериментальной установке.

Аналогичный вывод следует и в отношении определения потерь напора воздушного потока, продуваемого через канал. Потери напора, определенные в ходе тестовых численных экспериментов на представленной виртуальной экспериментальной установке с длиной канала 77 м и скоростью потока воздуха 7 м/с, составили 57 Па. При расчетах математической модели по общепризнанным методикам [19, 23] с использованием одинаковых величин всех требуемых характеристик получено значение потерь напора 64 Па, т. е. расхождение между результатами расчетов (контрольного – на базе [19, 23] и экспериментального – на виртуальной установке) составило 11 %.

Результаты начального этапа верификации модели допускают дальнейшую работу по решению задачи исследования процессов теплопереноса для разработки методики проектирования системы регенеративно-утилизационного теплоиспользования для теплотрасс в непроходных каналах.

ВЫВОДЫ

1. С помощью программного комплекса ANSYS создана виртуальная экспериментальная установка для исследования процессов аэродинамики и теплообмена в непроходных каналах. Выполненные тестовые численные эксперименты показали приемлемое совпадение результатов с физическими представлениями протекающих процессов.

2. Анализ процессов теплопереноса, имеющих место в непроходных каналах теплотрасс при реализации исследуемой технологии регенеративно-утилизационного теплоиспользования в системах централизованного теплоснабжения, позволил определить функции откликов и состав определяющих факторов. Обоснован выбор плана для дальнейшего численного эксперимента в виде шестифакторного ротatableльного центрального композиционного плана, определены уровни варьирования факторов.

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. 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.
3. Титков, Д. Г. Разработка методики расчета теплового режима подземного коллектора для инженерных коммуникаций / Д. Г. Титков. М., 2017. 162 с.

4. Основы работы в ANSYS 17 / Н. Н. Федорова [и др.]. М.: ДМК Пресс, 2017. 210 с.
 5. Тихонов, А. Н. Уравнения математической физики / А. Н. Тихонов, А. А. Самарский. 5-е изд. М.: Наука, 1977. 735 с.
 6. Самарский, А. А. Разностные методы решения задач газовой динамики / А. А. Самарский, Ю. П. Попов. М.: Наука, 1992. 424 с.
 7. Белоцерковский, О. М. Численное моделирование в механике сплошных сред / О. М. Белоцерковский. М.: Наука, 1984. 520 с.
 8. Зенкевич, О. С. Метод конечных элементов в технике / О. С. Зенкевич; пер. с англ. М.: Мир, 1975. 543 с.
 9. Тепловые сети. Строительные нормы проектирования: ТКП 45-4.02-182-2009 (02250). Минск: Минстройархитектуры, 2010. 53 с.
 10. Тепловая изоляция оборудования и трубопроводов. Правила расчета: ТКП 45-4.02-129-2009 (02250). Минск: Минстройархитектуры, 2010. 52 с.
 11. Чудновский, А. Ф. Теплофизика почв / А. Ф. Чудновский. М.: Наука, 1976. 353 с.
 12. Об утверждении Методики по определению потерь тепловой энергии в сетях тепло-снабжения с учетом их износа, срока и условий эксплуатации [Электронный ресурс]: постановление Комитета по энергоэффективности при Совете Министров Респ. Беларусь, 29 сент. 2006 г., № 2 // Электронная информационная система «Энергодokument». Режим доступа: <https://energodoc.by/file/fulltext-view/4690.pdf>. Дата доступа: 08.05.2017.
 13. Долгов, Ю. А. Методы обработки результатов пассивного эксперимента / Ю. А. Долгов, Т. В. Шестакова. Кишинев: Кишиневский политехнический институт имени С. Лазо, 1989. 32 с.
 14. Шестаков, В. Н. Планирование эксперимента в оптимизационных задачах технической мелиорации грунтов / В. Н. Шестаков. Омск: Изд-во «СибАДИ», 2007. 95 с.
 15. Тихомиров, В. Б. Планирование и анализ эксперимента (при проведении исследований в легкой и текстильной промышленности) / В. Б. Тихомиров. М.: Легкая индустрия, 1974. 262 с.
 16. Зедгинидзе, И. Т. Планирование эксперимента для исследования многокомпонентных систем / И. Т. Зедгинидзе. М.: Наука, 1976. 390 с.
 17. Новик, Ф. С. Математические методы планирования экспериментов в металловедении. Раздел 2 / Ф. С. Новик. М.: МИСИ, 1970. 79 с.
 18. Управление аэродинамической тенью над брызгальными бассейнами АЭС. Гидродинамическое моделирование / В. Г. Бекетов [и др.] // Глобальная ядерная безопасность. 2014. Т. 12, № 3. С. 78–84.
 19. Смыслов, В. П. Гидравлика и аэродинамика / В. В. Смыслов; пер. с укр., перераб. и доп. Киев: Вища шк., 1979. 336 с.
 20. Таблицы планов эксперимента для факторных и полиномиальных моделей / В. З. Бродский и [др.]. М.: Металлургия, 1982. 752 с.
 21. Тарасик, В. П. Математическое моделирование технических систем / В. П. Тарасик. Минск: Новое знание, 2013. 584 с.
 22. Справочник по наладке и эксплуатации водяных тепловых сетей / В. И. Манюк [и др.]. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Стройиздат, 1982. 215 с.
 23. Идельчик, И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям / И. Е. Идельчик; под ред. М. О. Штейнберга. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1992. 672 с.
- Поступила 10.09.2018 Подписана в печать 14.11.2018 Опубликована онлайн 30.01.2019

REFERENCES

1. Sednin V. A., Bubyr' T. V. (2017) Systems of Regenerative-Utilization Heat Consumption for Heat Pipelines in Impassable Channels. *Energiya i Menedzhment* [Energy and Management], 97 (4), 2–6 (in Russian).
2. Marchenko A. V. (2008) *Development of Technologies for the Use of CHP Boilers and their Blowers for Transport and Utilization of Ventilation Emissions of Industrial Enterprises and Highways*. Ulyanovsk. 175 (in Russian).

3. Titkov D. G. (2017) *Development of Methods for Calculating the Thermal Conditions of the Underground Collector for Utilities*. Moscow, 162 (in Russian).
4. Fedorova N. N., Val'ger S. A., Danilov M. N., Zakharova Yu. V. (2017) *Basics of ANSYS 17 Use*. Moscow, DMK Press Publ. 210 (in Russian).
5. Tikhonov A. N., Samarskii A. A. (1977) *Equations of Mathematical Physics*. 5th ed. Moscow, Nauka Publ. 735 (in Russian).
6. Samarskii A. A., Popov Yu. P. (1992) *Difference Methods for Solving Gas Dynamics Problems*. Moscow, Nauka Publ. 424 (in Russian).
7. Belotserkovskii O. M. (1984) *Numerical Simulation in Continuum Mechanics*. Moscow, Nauka Publ. 520 (in Russian).
8. Zenkevich O. S. (1975) *Finite Element Method in Engineering, Translated from English*. Moscow, Mir Publ. 543 (in Russian).
9. ТКР 45-4.02-182-2009 (02250). (2010) *Heat Pipelines. Construction Design Standards*, Minsk, Ministry of Architecture and Construction. 53 (in Russian).
10. ТКР 45-4.02-129-2009 (02250). (2010) *Thermal Insulation of Equipment and Pipelines. Calculation Rules*. Minsk, Ministry of Architecture and Construction. 52 (in Russian).
11. Chudnovskii A. F. (1976) *Thermophysics of Soils*. Moscow, Nauka Publ. 353 (in Russian).
12. On the Approval of the Technique for Determination of Losses of Thermal Energy in the Networks of Heat Supply Taking into Account their Wear, Term and Conditions of Operation: the Resolution of the Committee on Energy Efficiency of the Council of Ministers of the Republic of Belarus, 29 Sept. 2006, No 2. *Electronic Information System "Energodokument"*. Available at: <https://energodoc.by/file/fulltext-view/4690.pdf>. (Accessed: 8 May 2017) (in Russian).
13. Dolgov Yu. A., Shestakova T. V. (1989) *Methods of Processing the Results of Passive Experiment*. Chisinau, The Polytechnic Institute S. Lazo of Chisinau. 32 (in Russian).
14. Shestakov V. N. (2007) *Planning of Experiment in Optimization Problems of Technical Soil Reclamation*. Omsk, Siberian State Automobile and Highway University Publ. 95 (in Russian).
15. Tikhomirov V. B. (1974) *Planning and Analysis of the Experiment (During Light and Textile Industries Research)*. Moscow, Legkaya Industriya Publ. 262 (in Russian).
16. Zedginidze I. T. (1976) *Planning an Experiment to Study Multicomponent Systems*. Moscow, Nauka Publ. 390 (in Russian).
17. Novik F. S. (1970) *Mathematical Methods of Planning Experiments in Metal Science. Section 2*. Moscow, Moscow Institute of Civil Engineering. 79 (in Russian)
18. Beketov V. G., Kol'chenko O. L., Domrina G. V., Matevosyan Yu. M. (2014) Control of the Wind Shadow over the Spray Ponds of Nuclear Power Plants. Hydrodynamic Simulation. *Global'naya Yadernaya Bezopasnost' = Global Nuclear Safety*, 12 (3), 78–84 (in Russian).
19. Smyslov V. P. (1979) *Hydraulics and Aerodynamics*. Kiev, Vishcha Shkola Publ. 336 (in Russian).
20. Brodskii V. Z., Brodskii L. I., Golikova T. I., Nikitina E. P., Panchenko L. A. (1982) *Tables of Experiment Plans for Factorial and Polynomial Models*. Moscow, Metallurgiya Publ. 752 (in Russian).
21. Tarasik V. P. (2013) *Mathematical Modeling of Technical Systems*. Minsk, Novoe Znanie Publ. 584 (in Russian).
22. Manyuk V. I., Kaplinskii Ya. I., Khizh E. B., Manyuk A. I., Il'in V. K. (1982) *Guide for Setting up and Operation of the Water Heating Systems*. 2nd ed., Revised and Supplemented. Moscow, Stroiizdat Publ. 215 (in Russian).
23. Idel'chik I. E. (1992) *Handbook of Hydraulic Resistances*. 3rd ed. Moscow, Mashinostroenie Publ. 672 (in Russian).