

УПРАВЛЕНИЕ ИНФРАКРАСНОЙ МОДУЛЬНОЙ СИСТЕМОЙ ОБОГРЕВА КРУПНОГАБАРИТНЫХ ЦЕХОВ

Е.С. Шмелев,

Ученый секретарь Института энергетики НАН Беларуси, канд. техн. наук

А.П. Ахрамович,

ведущ. науч. сотр. Института энергетики НАН Беларуси, канд. техн. наук

К.В. Гаркуша,

ст. преподаватель каф. энергетики БГАТУ

Рассмотрен процесс поддержания нормируемых температурных условий на производственных участках крупногабаритных цехов с помощью модульной инфракрасной системы. Обоснован энергосберегающий алгоритм управления ее мощностью в рабочем и дежурном режимах. Предложен принцип распределения мощности по нагревательным элементам высокотемпературных инфракрасных излучателей с кусочно-непрерывным профилем поверхности отражателя. Сделан вывод о целесообразности двухпозиционного регулирования мощности – в дежурном режиме, а четырехпозиционного – в рабочем.

Ключевые слова: электрические высокотемпературные излучатели, отражатель с кусочно-непрерывным профилем поверхности, инфракрасный модуль, управление мощностью, рабочий и дежурный режимы.

The process of maintaining standardized temperature conditions in large-scale industrial workshops using a modular infrared system is considered. The energy-saving algorithm for controlling the system's power in operating and standby modes is justified. The principle for distributing power among heating elements of high-temperature infrared emitters with a piecewise-continuous reflector surface profile is proposed. It is concluded that two-position power control is appropriate in standby mode and four-position control is effective in operating mode.

Keywords: electric high-temperature emitters, reflector with a piecewise continuous surface profile, infrared module, power control, working and standby modes.

Введение

Электрическая инфракрасная система с блочной структурой, состоящая из отдельных автономных инфракрасных модулей, является одной из наиболее перспективных для отопления крупногабаритных производственных корпусов [1]. В ее состав входят высокотемпературные инфракрасные излучатели с тремя электронагревательными элементами и отражателем с кусочно-непрерывным профилем поверхности, шкафы управления, температурные датчики, кабельная продукция и коммутационная аппаратура.

Достичь высокой энергетической эффективности инфракрасной системы возможно только при автоматизации процесса обогрева, обеспечивающей поддержание тепловых условий в рабочей зоне в допустимых пределах и в соответствии с производственным графиком работ. Исследованию данного вопроса много внимания уделяли Ф.А. Миссенар, А.И. Богомолов, А. Мачкаши, А.К. Родин, Н.Н. Болотских [2-10]. Их анализ показал, что для разработки алгоритма управления не требуются сложные многомерные математические модели теплопереноса. Для этого приемлемы подходы, позволяющие наиболее отчетливо ви-

деть влияние воздействующих факторов на изменение тех или иных регулируемых параметров.

Целью работы является обоснование алгоритма управления мощностью инфракрасного модуля, позволяющего снизить энергетические затраты на поддержание нормируемых температурных условий на производственных участках крупногабаритных цехов.

Основная часть

Управление тепловыми условиями производственного участка

Рассмотрим производственный участок, представляющий собой замкнутый объем, ограниченный боковыми, нижней и верхней ограждающими конструкциями. На участке расположено технологическое оборудование, выделяющее при работе теплоту, в рабочее время включена вентиляция. Излучатели инфракрасного модуля разделены на две секции: верхнюю, создающую фоновую температуру на участке, и нижнюю – для поддержания требуемых тепловых условий в рабочий период.

При моделировании теплообмена падающий на оборудование лучистый поток учтем, как внутреннее

тепловыделение, добавляемое к выделяемой теплоте электродвигателями, а нагрев воздуха от поглощенного излучения смоделируем воздействием рассредоточенных по его объему внутренних источников. Тепловые потери определим с помощью коэффициента теплопередачи через ограждающие конструкции.

Запишем нестационарные уравнения сохранения энергии для воздуха и оборудования

$$C\rho V \frac{dT}{d\tau} = q + q_{vent} + (\alpha F)_{eq} (T_{eq} - T) + (kF)_w (T_{out} - T); \quad (1)$$

$$(C\rho V)_{eq} \frac{dT_{eq}}{d\tau} = q_{eq} + N_{eq} - (\alpha F)_{eq} (T_{eq} - T), \quad (2)$$

где C – удельная теплоемкость, Дж/(кг·К);

ρ – плотность, кг/м³;

V – объем, м³;

T – температура, К;

τ – время, с (индексом «w» обозначены параметры ограждений, «eq» – технологического оборудования, «out» – наружного воздуха; параметры без индексов относятся к внутреннему воздуху);

q – мощность внутренних источников (инфракрасного излучения, нагревающего воздух), Вт;

q_{vent} – мощность теплопоступлений от вентиляционного воздуха или отдачи ему теплоты, Вт;

α – коэффициент теплообмена, Вт/(м²·К);

F – площадь поверхности теплообмена, м²;

q_{eq} – лучистый поток, падающий на технологическое оборудование, Вт;

k – коэффициент теплопередачи, Вт/(м²·К);

N_{eq} – мощность тепловыделения от электродвигателей, Вт

Для исследования закономерностей изменения температур перепишем уравнения (1), (2) в безразмерном виде

$$\frac{d\theta}{d\tau} = K_q K_w + K_\sigma (\theta_{eq} - \theta) + K_w (\theta_{out} - \theta); \quad (3)$$

$$\frac{d\theta_{eq}}{d\tau} = K_\sigma (K_{eq} - \theta_{eq} + \theta), \quad (4)$$

где

$$\theta = \frac{T - T_{cal}}{T_n - T_{cal}}; \theta_{out} = \frac{T_{out} - T_{cal}}{T_n - T_{cal}}; \theta_{eq} = \frac{T_{eq} - T_{cal}}{T_n - T_{cal}};$$

$$\bar{\tau} = \frac{\tau}{\tau_p}; K_q = \frac{q + q_{vent}}{(kF)_w (T_n - T_{cal})};$$

$$K_w = \frac{(kF)_w \tau_p}{C\rho V}; K_{eq} = \frac{q_{eq} + N_{eq}}{(\alpha F)_{eq} (T_n - T_{cal})};$$

$$K_\sigma = \left(\frac{\alpha F}{C\rho V} \right)_{eq} \tau_p;$$

где T_n – нормируемая температура внутреннего воздуха в рабочее время, К;

T_{cal} – расчетная температура наружного воздуха, К;

τ_p – длительность рассматриваемого периода, с;

K_q – отношение подаваемой мощности на нагрев воздуха к тепловым потерям при $T = T_n$, $T_{out} = T_{cal}$;

K_{eq} – отношение выделяемой мощности в технологическом оборудовании к отдаваемой внутреннему воздуху;

K_w и K_σ – отношение отдаваемой энергии к поглощаемой для воздуха и технологического оборудования соответственно.

Для решения системы зададим начальные условия: $\bar{\tau} = 0$; $\theta = \theta_0$; $\theta_{eq} = \theta_{eq0}$.

График работы цеха (идет производственный процесс – рабочий режим; работы не проводятся – дежурный режим) обуславливает функционирование инфракрасного модуля.

Рассмотрим дежурный режим, приняв для начала, что на рабочем участке нет технологического оборудования, а параметр K_w и температура наружного воздуха не меняются во времени, вентиляция отключена. Тогда проинтегрируем уравнение (3), задав $\theta = 1$ при $\bar{\tau} = 0$, и запишем решение в виде:

$$\theta = \theta_{out} + K_q + (1 - \theta_{out} - K_q) \exp(-K_w \bar{\tau}). \quad (5)$$

Проанализируем полученное уравнение (5). На первом этапе дежурного режима происходит остывание воздуха ($K_q = 0$) – снижение температуры от начального значения $\theta = 1$ по экспоненте, крутизна которой зависит от величины K_w . Строительными нормами регламентирована минимальная температура воздуха в дежурном режиме $T_{min} = 5$ °С (по ее достижении необходимо включать систему обогрева). Включение системы возможно при любой температуре из диапазона $\theta \in [\theta_{min}; 1]$, до которой она снижается за период τ^* . В любом случае к началу рабочей смены требуется обеспечить нормируемое значение T_n . Возникает вопрос, как это сделать с наименьшими затратами энергии.

Воспользовавшись уравнением (5), найдем промежутки времени τ^* , за которые температура снижается до θ^* , и промежутки τ^{**} , за которые она поднимается от θ^* до 1 к началу рабочей смены:

$$\tau^* = \frac{1}{K_w} \ln \frac{\theta^* - \theta_{out}}{1 - \theta_{out}}; \quad (6)$$

$$\tau^{**} = 1 - \frac{1}{K_w} \ln \frac{\theta^* - \theta_{out} - K_q}{1 - \theta_{out} - K_q}. \quad (7)$$

Если $\tau^* > 1 - \tau^{**}$, то мощности инфракрасного модуля недостаточно, чтобы обеспечить нормируемую температуру. При $\tau^* < 1 - \tau^{**}$ в промежуточном интервале между остыванием и нагревом («натопом») требуется подводить мощность, компенсирующую тепловые потери для стабилизации температуры.

Затраты энергии за весь период дежурного режима составят

$$E = E^* + E^{**} \quad (8)$$

$$E^* = K_q^* (\tau^{**} - \tau^*); E^{**} = K_q (1 - \tau^{**}), \quad (9)$$

где K_q^* находится из условия $\theta = \theta^* = \text{Const}$.

Подставим выражения (6) и (7) в (8) и продифференцируем по K_q , а полученное выражение приравняем к нулю. В результате получим трансцендентное уравнение

$$\ln \frac{\theta^* - \theta_{out} - K_q}{1 - \theta_{out} - K_q} + \frac{1 - \theta^*}{1 - \theta_{out} - K_q} = 0, \quad (10)$$

которое имеет решение при $K_q \rightarrow \infty$.

Таким образом, при возрастании внедряемой мощности сокращается потребление энергии. Наименее энергозатратным алгоритмом работы инфракрасной системы обогрева в дежурном режиме, учитывая, что внедряемая мощность ограничена сверху величиной установленной мощности, является следующий:

1) отключение инфракрасного модуля на период $[0; \tau^*]$, за который воздух охлаждается до минимально возможной температуры $\theta^* = \theta_{min}$;

2) включение верхней секции модуля на мощность K_q^* на период $[\tau^*; \tau^{**}]$ для поддержания температуры $\theta = \theta^*$;

3) включение инфракрасного модуля (верхней и нижней секций) на полную мощность и нагрев воздуха до нормируемой рабочей температуры за период $[\tau^{**}; 1]$;

4) если установленной мощности недостаточно (например, при резких похолоданиях) для прогрета воздуха от θ_{min} до $\theta = 1$ за интервал времени $1 - \tau^{**}$, то включить инфракрасный модуль следует ранее, при $\theta = \theta^* > \theta_{min}$.

В реальных условиях производства на тепловую обстановку оказывает влияние технологическое оборудование, имеющее большую массу, а, следовательно, и тепловую инерционность. Временные зависимости температуры воздуха и оборудования находятся из решения системы уравнений (3), (4). Результаты расчетов показали, что остывание воздуха с учетом технологического оборудования замедляется, и при большой его тепловой инерционности может не достигнуть минимально допустимой температуры. В то же время в режиме «натоп» кривые изменения температуры воздуха с учетом оборудования и без его учета практически совпадают (различие даже к началу рабочего режима не превышает нескольких градусов). Однако это имеет место только при условии, что оборудование имело начальную температуру, близкую к нормируемой температуре воздуха. После выходных или праздничных дней, естественно, необходима дополнительная энергия на его прогрев.

Таким образом, преимущество аккумуляции теплоты заключается в продлении периода снижения температуры воздуха до предельно допустимых значений, а, следовательно, и в уменьшении энергетических затрат. Данный вывод справедлив и при учете тепловой инерционности ограждающих конструкций.

В период рабочего режима включены – система вентиляции и технологическое оборудование. Дополнительная теплота позволяет снизить мощность инфракрасного модуля, и для управления тепловыми условиями в рабочей зоне ограничиться только нижней секцией излучателей, оставив для верхней поддержание «фоновой» температуры θ_f , значение которой зависит от установленных мощностей секций, вентиляции, массы технологического оборудования, температуры наружного воздуха, и может быть найдена из условия минимизации затрат на обогрев и вентиляцию.

Управление мощностью инфракрасных излучателей

Характерная особенность высокотемпературных инфракрасных излучателей заключается в малой маневренности – узости диапазона возможного изменения мощности [1; 8]. В связи с этим поддержание нормируемых температурных условий происходит в импульсном режиме путем включения-отключения излучателей. С целью более точного соблюдения требуемой температуры следует изменять мощность хоть и ступенчато, но с меньшим шагом. Для этого ТЭНы всех излучателей нижней секции разделяются на группы, в каждую из которых входит по одному ТЭНу излучателя. В этом случае мощность секции может принимать уже не два значения: 0; 1 номинальной мощности N_n (двухпозиционное регулирование), а четыре: 0; 1/3; 2/3; 1 (четырёхпозиционное регулирование).

Процесс управления строится следующим образом. Весь диапазон допустимых значений температуры воздуха $T_n \pm \Delta T_n$ разбивается на два интервала, и значения их границ в порядке возрастания Θ_i , $i = 1, 3$ вносятся в таблицу температурных уставок. Текущая температура воздуха в контрольных точках рабочей зоны сравнивается с табличными данными и по результатам дается команда на включение или отключение групп ТЭНов

$$\begin{aligned} T < \Theta_1; N &= N_n; \\ \Theta_1 \leq T < \Theta_2; N &= 2/3 N_n; \\ \Theta_2 \leq T < \Theta_3; N &= 1/3 N_n; \\ T \geq \Theta_3; N &= 0. \end{aligned} \quad (11)$$

Обозначив номинальную мощность i -й группы ТЭНов как N_i , запишем формулу для расчета суммарной мощности в виде:

$$N = \sum_{i=1}^3 N_i U(\Theta_i - T) [2U(\Theta_i - T) - 1], \quad (12)$$

где U – ступенчатая единичная симметричная функция.

Теплоотдача с поверхности ТЭНов осуществляется за счет радиационного и конвективного механизмов переноса энергии. При работе на мощностях, близких к номинальной, лучистая теплоотдача преоб-

лаждает над конвективной, и входящие в уравнения (1), (2) мощности будут равны

$$q = \varepsilon_{air} N; \quad q_{eq} = \varepsilon_{eq} N, \quad (13)$$

где ε_{air} – доля поглощенного воздухом лучистого потока;

ε_{eq} – доля лучистого потока, падающего на технологическое оборудование.

Решение системы уравнений (1), (2) после подстановки выражений (13) находится численными методами. Его устойчивость и единственность требуют, чтобы подынтегральные выражения были непрерывно дифференцируемыми. Для этого аппроксимируем ступенчатые функции непрерывными, воспользовавшись функцией ошибок, которая хорошо зарекомендовала себя при практических расчетах

$$U(\Theta_i - T) = \lim_{\varphi \rightarrow 0} \frac{1}{2} \left[\operatorname{erf} \left(\frac{\Theta_i - T}{\varphi} \right) + 1 \right]. \quad (14)$$

Выполнив расчет с несколькими убывающими значениями φ , окончательное решение найдем путем экстраполяции при $\varphi \rightarrow 0$.

На рисунке 1 представлены графики изменения температуры воздуха (а), а также суммарной мощности излучателей, отнесенной к номинальной (б), при постоянной температуре наружного воздуха.

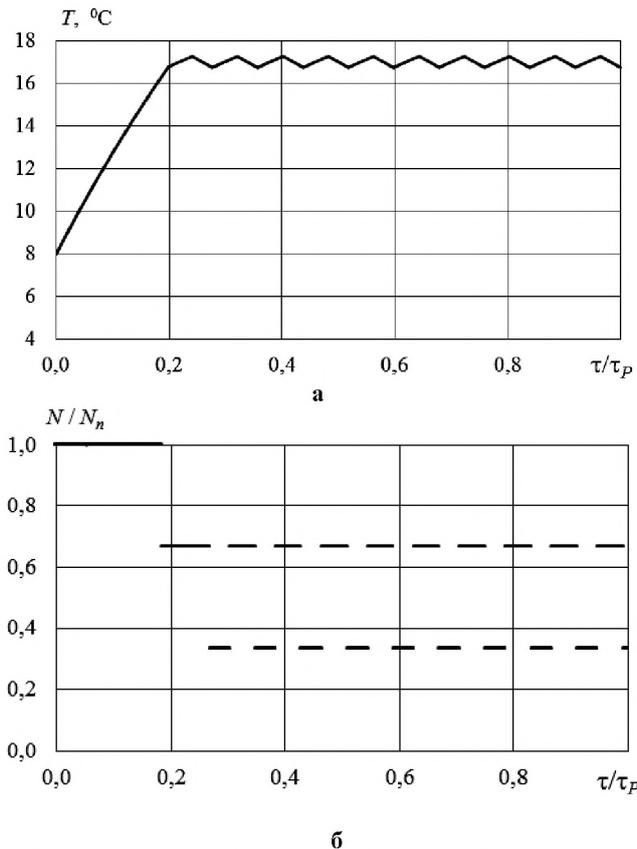


Рисунок 1. Четырехпозиционное управление мощностью инфракрасного модуля: а – температура воздуха; б – суммарная относительная мощность инфракрасных излучателей

В дежурном режиме в промежутке между периодами остывания и «натопы» можно одновременно изменять мощность всех излучателей, не деля ТЭНы на группы, поскольку диапазон допустимых колебаний температуры более широк.

Для уменьшения количества переключений с мощности на мощность, которые ведут к ослаблению контактов и уменьшению срока службы ТЭНов, используем распространенный прием – температурный гистерезис. Суть его заключается в различии температур срабатывания команд на включение и отключение групп ТЭНов. В этом случае важна настройка блока управления – поиск оптимальных значений температуры срабатывания регулятора.

На рисунке 2 приведены – температурная кривая (а) и изменение относительной мощности инфракрасного модуля (б) при двухпозиционном регулировании мощности.

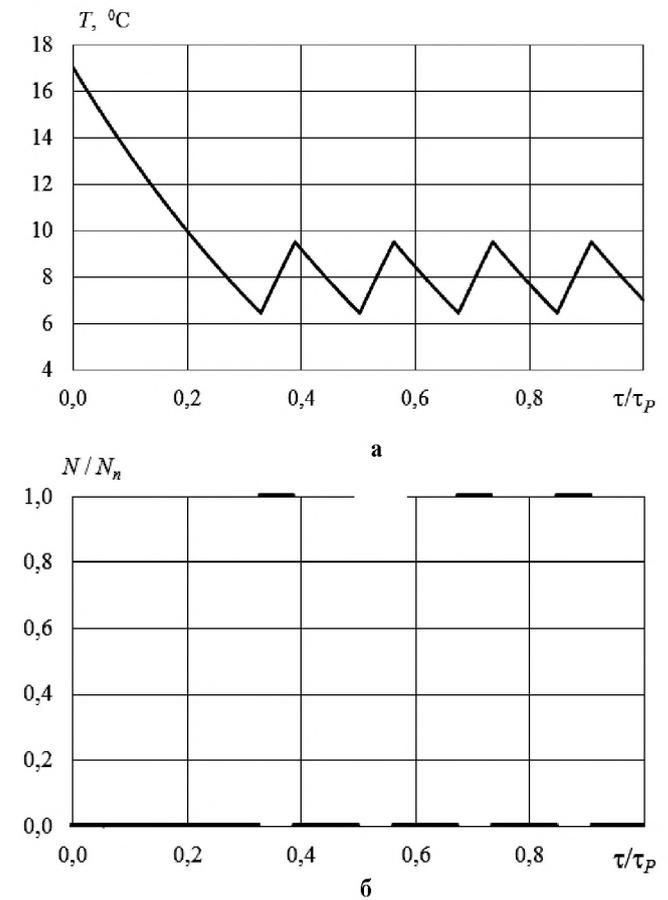


Рисунок 2. Двухпозиционное управление мощностью инфракрасного модуля: а – температура воздуха; б – суммарная относительная мощность инфракрасных излучателей

Применение гистерезиса позволяет снизить количество переключений мощности в 4-6 раз в зависимости от величины рассогласования установленных температур включения-выключения группы ТЭНов (0,5-1,5 °С). При увеличении диапазона рассогласования амплитуда колебаний растет.

Заклучение

В результате проведенных исследований установлен порядок работы инфракрасного модуля в дежурном и рабочем режимах. Добиться более точного поддержания нормируемой температуры можно не только за счет разбиения ТЭНов на группы, но и изменения мощности группы ТЭНов (например, до 0,75 номинальной). Так, если мощность только одной группы ТЭНов принимает три значения (0; 0,75; 1 от номинальной), то число уставок уже будет равно 7, а в случае, когда две группы ТЭНов смогут иметь по три значения мощности, их число увеличится до 9. При этом интервалы между температурными уставками уменьшаются так же, как и периоды времени между изменениями мощности, растет количество переходов с мощности на мощность.

Рациональным подходом к оптимизации регулирования работой модулей является снижение количества групп ТЭНов, что позволяет избежать роста числа переключений и усложнения блоков управления. В ином случае дополнительно требуется повысить точность замеров температуры в контрольных точках, в то время как в алгоритме управления используются осредненные значения, уже вносящие определенную погрешность.

Таким образом, четырехпозиционное регулирование мощности в рабочее время является вполне приемлемым вариантом для поддержания температуры производственного участка в допустимых пределах. В дежурном режиме и для создания фоновой температуры можно ограничиться двухпозиционным регулированием. При этом для уменьшения частоты изменения мощности применяется температурный гистерезис.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Шмелев, Е.С. Модульная инфракрасная система отопления крупногабаритных производственных корпусов / Е.С. Шмелев, А.П. Ахрамович, В.К. Гаркуша // Агропанорама. – 2025. – № 2 – С. 13-17.

2. Строй, А.Ф. Управление тепловым режимом зданий и сооружений / А.Ф. Строй. – Киев: Вища школа, 1993. – 154 с.

3. Табунщиков, Ю.А. Математическое моделирование и оптимизация тепловой эффективности зданий / Ю.А. Табунщиков, М.М. Бродач. – М.: АВОК-ПРЕСС, 2002. – 194 с.

4. Нагорная, А.Н. Математическое моделирование и исследование нестационарного теплового режима зданий: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.18 / Нагорная Анастасия Николаевна; ГОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет». – Челябинск, 2008. – 148 с.

5. Дмитриев, Г.М. Базовая модель сопряженного расчета оптимальных параметров системы инфракрасного обогрева цехов приборостроительных предприятий: дис. ... канд. техн. наук: 01.04.14 / Дмитриев Геннадий Михайлович; ГНУ «Объединенный институт энергетических и ядерных исследований «Сосны» НАН Беларуси. – Минск, 2003. – 165 с.

6. Тверской, М.М. Постановка задачи оптимального управления тепловым режимом здания при комбинированной системе отопления / М.М. Тверской, Д.В. Румянцев // Вестник ЮУрГУ. Сер. Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. – 2012. – Вып. 16, № 23. – С. 16-20.

7. Панферов, В.И. Об оптимальном управлении тепловым режимом зданий / В.И. Панферов, Е.Ю. Анисимова, А.Н. Нагорная // Вестник ЮУрГУ. Сер. Энергетика. – 2007. – Вып. 8, № 20. – С. 3-9.

8. Ахрамович, А.П. Развитие инфракрасного электрообогрева в Республике Беларусь / А.П. Ахрамович, Е.С. Шмелев // Энергоэффективность. – 2021. – № 9. – С. 30-32.

9. Ясинский, Ф.Н. Математическое моделирование процессов вентиляции и отопления больших производственных, культурных и спортивных помещений // Ф.Н. Ясинский, А.С. Кокорин // Вестник ИГЭУ. – 2010. – Вып. 3. – С. 1-3.

10. Корн, Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров / Г. Корн, Т. Корн. – М.: Наука, 1970. – 720 с.

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 05.11.2025

“Агропанорама” - научно-технический журнал для работников агропромышленного комплекса. Это издание для тех, кто стремится донести результаты своих исследований до широкого круга читателей, кого интересуют новые технологии, кто обладает практическим опытом решения задач.

Журнал “Агропанорама” включен в список изданий, рекомендуемых Высшей аттестационной комиссией для опубликования результатов диссертационных исследований по техническим (сельскохозяйственное машиностроение и энергетика, технический сервис в АПК), экономическим (АПК) и сельскохозяйственным наукам (зоотехния).

Подписной индекс в каталоге Республики Беларусь: для индивидуальных подписчиков - 74884, предприятий и организаций - 748842.

Стоимость подписки на 1-е полугодие 2026 года: для индивидуальных подписчиков - 61,68 руб., ведомственная подписка - 63,63 руб.