



**ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ  
ВЕНТИЛЯТОРОВ АППАРАТОВ ВОЗДУШНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ГАЗА С  
АНАЛИТИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКОЙ ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ**

**Масков<sup>1</sup> Л.Р., Сафин<sup>2</sup> А.Р.**

**<sup>1</sup>ООО «Газпром добыча Ямбург», г. Новый Уренгой, Россия**

**<sup>2</sup>Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия**

*maskov.linar@mail.ru, Sarkazan@bk.ru*

**Резюме:** *АКТУАЛЬНОСТЬ.* Аппараты воздушного охлаждения (АВО) газа с дискретным управлением электроприводами вентиляторов широко применяются на газотранспортных предприятиях, однако существующие схемы дискретного управления характеризуются повышенным энергопотреблением и недостаточной точностью регулирования. Отсутствие аналитически обоснованных критериев оценки теплотехнического состояния секций АВО дополнительно снижают эффективность управления при ухудшении теплообменных характеристик оборудования. **ЦЕЛЬ.** Разработка аналитически обоснованной методики оптимального дискретного управления электроприводами вентиляторов АВО газа, обеспечивающей снижение энергопотребления при сохранении требуемой эффективности охлаждения и стабильности температурного режима. **МЕТОДЫ.** Использованы аналитические методы теплотехнического анализа, регрессионное моделирование паспортных характеристик и методы оптимизации режимов многоступенчатых систем охлаждения. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** Получен интегральный показатель тепловой эффективности многоступенчатых систем охлаждения и предложен критерий оценки теплотехнического состояния АВО газа, предназначенный для использования в системах управления электроприводами вентиляторов. Разработан принцип послойного включения вентиляторов и сформулирован объединённый критерий оптимизации, позволяющий совместно учитывать энергосбережение и стабильность температурного режима. Обоснована возможность снижения энергопотребления без ухудшения теплотехнических характеристик. **ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** Предложенный подход позволяет повысить энергетическую эффективность и адаптивность дискретных систем управления электроприводами вентиляторов АВО газа и обеспечивает возможность внедрения в существующие установки охлаждения газа без модернизации аппаратной части.

**Ключевые слова:** *коэффициент регенерации; интегральный показатель эффективности теплообменного аппарата; регрессионная модель тепловой эффективности; интегральный диагностический критерий; принцип послойного управления вентиляторами; двухцелевая оптимизация; объединённый критерий оптимизации.*

**Для цитирования:** Масков Л.Р., Сафин А.Р. Интеллектуальная система управления электроприводами вентиляторов аппаратов воздушного охлаждения газа с аналитической диагностикой теплотехнического состояния // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2026. Т. 28. № 3. С. 63-85. doi: 10.30724/1998-9903-2026-28-3-63-85.

**OPTIMIZATION OF DISCRETE CONTROL OF ELECTRIC ACTUATORS OF  
VENTILATORS OF GAS AIR COOLING APPLIANCES WITH ANALYTICAL  
DIAGNOSTICS OF THERMAL CONDITION**

**Maskov<sup>1</sup> L.R., Safin<sup>2</sup> A.R.**

**<sup>1</sup>Gazprom Dobycha Yamburg LLC, Novy Urengoy, Russia.**

**<sup>2</sup>Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia**

*Maskov.linar@mail.ru, Sarkazan@bk.ru*

**Abstract:** RELEVANCE. Gas air-cooling units (ACU) with discrete control of fan electric drives are widely used in gas transportation facilities, but existing discrete control schemes are characterized by increased energy consumption and insufficient regulation accuracy. The lack of analytically substantiated criteria for assessing the thermal condition of ACU sections further reduces the efficiency of control when the heat exchange characteristics of the equipment deteriorate. PURPOSE. Development of an analytically substantiated methodology for optimal discrete control of gas ACU fan electric drives, which ensures reduced energy consumption while maintaining the required cooling efficiency and temperature stability. METHODS. Analytical methods of thermal engineering analysis, regression modeling of passport characteristics, and methods of optimizing the modes of multi-stage cooling systems were used. RESULTS. An integral indicator of the thermal efficiency of multi-stage cooling systems has been obtained, and a criterion for assessing the thermal technical state of gas cooling towers has been proposed for use in fan drive control systems. A layer-by-layer fan activation principle has been developed, and a combined optimization criterion has been formulated that allows for the simultaneous consideration of energy savings and temperature stability. The possibility of reducing energy consumption without compromising thermal technical characteristics has been substantiated. CONCLUSION. The proposed approach allows to increase the energy efficiency and adaptability of discrete control systems for electric drives of gas ACU fans and provides the possibility of implementation in existing gas cooling systems without hardware upgrades.

**Keywords:** regeneration coefficient; integral indicator of heat exchanger efficiency; regression model of thermal efficiency; integral diagnostic criterion; layer-by-layer fan control principle; dual-objective optimization; general optimization criterion.

**For citation:** Maskov L.R., Safin A.R. Optimization of discrete control of electric actuators of ventilators of gas air cooling appliances with analytical diagnostics of thermal condition. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2026; 28 (3): 63-85. doi: 10.30724/1998-9903-2026-28-3-63-85.

### **Введение (Introduction)**

Аппараты воздушного охлаждения (АВО) газа являются важнейшими элементами технологического цикла в газотранспортных системах. Их основное назначение заключается в обеспечении требуемых температурных параметров газа после компримирования и перед подачей в магистральный трубопровод. От эффективности работы АВО напрямую зависят энергетические затраты предприятия, надёжность функционирования оборудования и стабильность режимов транспортировки газа. В большинстве действующих газотранспортных объектов ПАО «Газпром» АВО эксплуатируются в течение десятков лет и оснащены вентиляторами с нерегулируемыми электроприводами. Управление их работой, как правило, осуществляется дискретным способом с помощью ступенчатого включения и отключения отдельных вентиляторов, число которых определяется оператором индивидуально в зависимости от температуры охлаждаемого газа и окружающей среды. Дискретный способ управления получил широкое распространение благодаря простоте реализации, высокой надёжности и невысокой стоимости оборудования, но имеет ряд известных недостатков [1-2]: 1) неточность поддержания температуры; 2) низкая энергетическая эффективность. Кроме того, частые пуски электродвигателей с длительными пусковыми токами вызывают повышенные электромеханические нагрузки, сокращая ресурс электрооборудования, и негативно влияют на питающую сеть [3].

Анализ литературы [4-11] показывает, что современное развитие систем управления АВО связано с интеграцией интеллектуальных алгоритмов и адаптивных моделей, обеспечивающих оптимальное распределение нагрузки между вентиляторами и повышение общей энергетической эффективности установок охлаждения газа. Вместе с тем анализ существующих исследований показывает наличие ряда нерешённых вопросов. В большинстве работ, посвящённых управлению АВО газа, основное внимание уделяется либо частотно-регулируемым электроприводам, либо эмпирическим и вычислительным методам оптимизации, что ограничивает возможность их применения на действующих объектах с нерегулируемыми электроприводами. Недостаточно разработаны аналитические модели, позволяющие установить взаимосвязь между последовательным включением вентиляторов и распределением тепловой нагрузки в многоступенчатых схемах охлаждения. Отсутствуют интегральные показатели, которые могли бы

одновременно использоваться для диагностики теплотехнического состояния секций и для синтеза алгоритмов дискретного управления электроприводами в условиях неполной измеримости параметров. Указанные пробелы затрудняют построение энергоэффективных и адаптивных систем управления электроприводами вентиляторов АВО газа и определяют необходимость разработки аналитически обоснованного подхода, восполняющего данные ограничения. Несмотря на развитие частотно-регулируемого электропривода, дискретное управление остаётся наиболее распространённым методом в эксплуатации АВО, особенно на объектах, где модернизация оборудования экономически нецелесообразна. Поэтому повышение эффективности и адаптивности именно дискретных систем управления представляет собой актуальную научно-техническую задачу. Решение этой задачи требует разработки алгоритмов, обеспечивающих оптимальный выбор числа включённых вентиляторов и последовательности их переключений по критерию минимума расхода электроэнергии при обеспечении заданной температуры газа на выходе, учитывающих нелинейные зависимости теплообмена и инерционность тепловых процессов в АВО газа.

Разработка алгоритмов оптимального дискретного управления электроприводами вентиляторов АВО газа позволит обеспечить:

- 1) возможность внедрения в существующие системы управления без модернизации силового оборудования;
- 2) повышение надёжности электроприводов за счёт сокращения числа пусков и равномерного распределения температурного профиля по длине АВО;
- 3) снижение энергопотребления электроприводов вентиляторов без ухудшения тепловых характеристик АВО газа.

Целью настоящей работы является оптимизация режима работы электроприводов вентиляторов АВО газа с учётом неравномерного распределения тепловой нагрузки в многоступенчатых системах охлаждения по критериям минимума потребления электроэнергии и отклонения фактической эффективности от заданного режима с учётом фактического теплотехнического состояния секций, определяемого диагностическим показателем.

Научная значимость работы заключается в развитии теоретических основ анализа и оптимизации электротехнических систем с групповыми асинхронными электроприводами вентиляторов АВО газа. В работе впервые получено аналитическое выражение интегрального показателя эффективности многоступенчатой системы охлаждения, используемого в качестве управляющего параметра электротехнической системы управления электроприводами. Предложены интегральный критерий теплотехнического состояния и секционный диагностический показатель, обеспечивающие формирование диагностической информации для систем управления электроприводами в условиях неполной измеримости параметров. Разработанные аналитические модели и критерии формируют математическую основу синтеза алгоритмов дискретного управления электротехническими комплексами АВО газа, направленных на повышение энергетической эффективности и надёжности электроприводов.

#### ***Материалы и методы (Materials and methods)***

##### *Вывод общего коэффициента регенерации при двухступенчатом охлаждении*

Важнейшим показателем эффективности теплообмена между теплоносителем и охлаждающим воздухом в АВО газа является коэффициент регенерации (КР) [12]. КР показывает, насколько эффективно АВО охлаждает теплоноситель, то есть какую долю максимально возможного охлаждения оно реально обеспечивает и представляет собой отношение разности температур на входе и выходе из АВО к его тепловому напору:

$$\eta = \frac{t_{\text{вх}} - t_{\text{вых}}}{t_{\text{вх}} - t_{\text{oc}}}, \quad (1)$$

где  $t_{\text{вх}}$  – температура на входе АВО;  $t_{\text{вых}}$  – температура на выходе АВО;  $t_{\text{oc}}$  – температура окружающей среды (воздух).

При последовательном соединении АВО совокупная эффективность всей системы формируется из локальных КР, которые показывают насколько эффективно работает каждая отдельная часть (секция) теплообменного аппарата, обдуваемая своим вентилятором. Рассмотрим схему двухступенчатого охлаждения при последовательном соединении АВО типа 2АВГ-75 (рис.1).

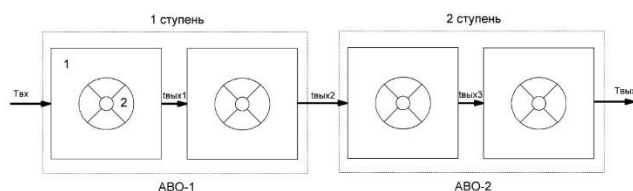


Рис.1. Схематическое изображение двухступенчатой схемы охлаждения: 1 – теплообменная секция; 2 – вентилятор

\*Источник: составлено авторами Source: compiled by the authors.

Локальные КР в теплообменных секциях в соответствии с (1) определяются как:

$$\eta_1 = \frac{t_{вх} - t_{вых1}}{t_{вх} - t_{ос}}; \eta_2 = \frac{t_{вых1} - t_{вых2}}{t_{вых1} - t_{ос}}; \eta_3 = \frac{t_{вых2} - t_{вых3}}{t_{вых2} - t_{ос}}; \eta_4 = \frac{t_{вых3} - t_{вых}}{t_{вых3} - t_{ос}}. \quad (2)$$

Из выражений (2) следует, что выходные температуры газа из каждой секции охлаждения одновременно являются входными температурами для последующих секций. Это приводит к взаимозависимости уравнений теплообмена в каждой секции, что значительно осложняет прямое аналитическое определение промежуточных температур между вентиляторами. Ввиду нелинейного характера изменения температурного напора и различий в локальных условиях теплообмена (расход, эффективность теплоотдачи), расчёт каждой промежуточной температуры требует итерационного решения системы уравнений теплового баланса. Такой подход затруднителен при анализе многоступенчатых схем охлаждения газа. Для упрощения анализа целесообразно использовать интегральный подход, при котором эффективность всей системы будет описываться единым выражением, что позволит учитывать совокупный эффект работы всех ступеней без необходимости поэтапного определения промежуточных температур. Интегральный подход даст возможность оценить тепловую эффективность системы в целом и провести энергетическую оптимизацию без усложнения расчётной схемы.

При дальнейшем теоретическом анализе и расчётах тепловой эффективности АВО принимаются следующие допущения, упрощающие математическое описание:

- 1) все теплообменники идентичны, то есть КР для каждой секции считаются одинаковыми;
- 2) температуры, массовые расходы и тепловые потоки считаются стационарными, то есть не изменяются во времени;
- 3) тепловые потери в окружающую среду отсутствуют, что позволяет рассматривать термодинамическую систему как замкнутую;
- 4) удельные теплоёмкости метана и воздуха принимаются постоянными величинами в рассматриваемом диапазоне температур;
- 5) коэффициент теплопередачи внутри каждой секции постоянен, что исключает влияние температурных и скоростных градиентов на поверхности теплообмена;
- 6) метан и воздух сохраняют агрегатное состояние в процессе теплообмена, то есть не происходит фазовых переходов;
- 7) неравномерность обдува и распределения температуры по длине труб и между секциями пренебрегается, процесс рассматривается как равномерный;
- 8) температуры и скорости потоков усреднены по поперечному сечению, что позволяет использовать одномерное приближение при описании тепловых процессов.

Для нахождения выходной температуры первой секции выразим ее через первое выражение (2):

$$t_{вых1} = t_{вх} - \eta \cdot (t_{вх} - t_{ос}) = t_{ос} + (t_{вх} - t_{ос})(1 - \eta). \quad (3)$$

Тогда выходная температура из второй секции с учетом подстановки выходной температуры из первой секции (3) примет вид:

$$t_{вых2} = t_{ос} + (t_{ос} + (t_{вх} - t_{ос})(1 - \eta) - t_{ос})(1 - \eta) = t_{ос} + (t_{вх} - t_{ос})(1 - \eta)^2. \quad (4)$$

При дальнейшем решении выходные температуры из третьей и четвертой секции принимают вид рекуррентной зависимости:

$$t_{выхi} = t_{ос} + (t_{вх} - t_{ос})(1 - \eta)^i, \text{ где } i \neq 0 \quad (5)$$

где  $i$  – номер секции.

Если (5) подставить в (2) и упростить, то получим компактное аналитическое выражение для определения КР:

$$\eta_{\text{общ}} = 1 - (1 - \eta)^i, \text{ где } (1 - \eta) \neq 0 \quad (6)$$

Выражение (6) представляет собой интегральный показатель тепловой эффективности, который описывает суммарную эффективность теплообмена всех секций многоступенчатых схем АВО газа.

*Вывод тепловой нагрузки АВО газа с помощью интегрального показателя*

Коэффициент регенерации можно определить через отношение тепловых нагрузок:

$$\eta = \frac{Q}{Q_{\text{max}}}, \quad (7)$$

где  $Q$  – тепловая нагрузка;  $Q_{\text{max}}$  – максимальная тепловая нагрузка.

Максимальная нагрузка определяется:

$$Q_{\text{max}} = G_{\text{газ}} \cdot c_{\text{газ}} \cdot (t_{\text{вх}} - t_{\text{ос}}), \quad (8)$$

где  $G_{\text{газ}}$  – массовый расход газа (метан);  $c_{\text{газ}}$  – теплоемкость газа.

Если выразить  $Q_i$  из (7), то получим:

$$Q = \eta \cdot G_{\text{газ}} \cdot c_{\text{газ}} \cdot (t_{\text{вх}} - t_{\text{ос}}). \quad (9)$$

Если сделать необходимые преобразования из (6), то выражение (9) для нахождения тепловой нагрузки на  $i$ -ой секции примет вид:

$$Q_i = \eta \cdot G_{\text{газ}} \cdot c_{\text{газ}} \cdot (t_{\text{вх}} - t_{\text{ос}}) \cdot (1 - \eta)^{i-1}. \quad (10)$$

Выражения (6) и (10) последовательно учитывают вклад каждого вентилятора в секции в общий процесс теплообмена, что позволяет более точно описывать изменение тепловой эффективности при включении или отключении вентиляторов и, следовательно, служит средством оценки тепловых нагрузок и математической основой для оптимизации дискретного управления.

Проведем графический анализ, полученных выражений (6) и (10) для двухступенчатой схемы охлаждения АВО газа. На графике (рис.2) представлены распределение относительных тепловых нагрузок ( $Q_{\text{отн}}$ ) по секциям и изменение интегрального коэффициента тепловой эффективности КР ( $\eta_{\text{общ}}$ ) при значении локального КР ( $\eta = 0,5$ ) для одной секции (все секции и аппараты одинаковые). Анализ графика показывает, что каждая последующая секция обеспечивает всё меньший прирост передаваемой теплоты, что обусловлено снижением температурного напора между газом и воздухом по мере последовательного охлаждения в аппарате. Уже при четырёх работающих вентиляторах эффективность системы приближается к предельному значению (94 %), при этом увеличение числа вентиляторов даёт незначительное улучшение тепловой эффективности при существенном росте энергопотребления, что позволяет обосновать рациональное количество работающих вентиляторов при оптимизации режима работы АВО газа.

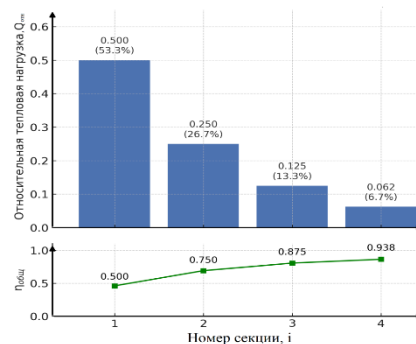


Рис.2. Распределение тепловой нагрузки и КР при *Fig. 2. Distribution of thermal load and regeneration coefficient (RC) during two-stage cooling*

*\*Источник: составлено авторами Source: compiled by the authors.*

*Сравнительный анализ интегрального метода и NTU-модели*

Для проверки точности предложенного интегрального подхода был выполнен сравнительный анализ с методом  $NTU$  (*Number of Transfer Units*), который широко используется в инженерной практике для оценки работы теплообменных аппаратов с перекрестным током. Подход  $NTU$  представляет собой аналитическую методику, позволяющую определить эффективность теплообменного аппарата через связь между коэффициентом регенерации и числом единиц переноса ( $NTU$ ). Метод предназначен для

случаев, когда выходные температуры потоков неизвестны, а расчёт опирается лишь на их входные параметры и конструктивно-эксплуатационные характеристики оборудования [13–15].

Метод  $NTU$  использует зависимость КР для теплообменного аппарата с перекрестным током [16]:

$$\eta = 1 - \exp\left(\frac{1}{s} \cdot NTU^{0,22} \cdot (\exp(-s \cdot NTU^{0,78}) - 1)\right), \quad (11)$$

где  $NTU$  – число единиц переноса, которое определяется как:

$$NTU = \frac{U \cdot A}{G_{\text{газ}} \cdot c_{\text{газ}}}, \quad (12)$$

где  $U$  – коэффициент теплопередачи;  $A$  – площадь теплообменной поверхности секции;  $s$  – отношение теплоемкостей потоков для теплообменника:

$$s = \frac{C_{\text{газ}}}{C_{\text{возд}}}, \quad (13)$$

где  $C_{\text{газ}}$  – теплоемкость потока метана,  $C_{\text{возд}}$  – теплоемкость потока воздуха.

Для оценки чувствительности интегрального метода к неоднородности условий теплообмена была проведена серия расчётов, в которых локальная эффективность отдельных секций задавалась различными значениями, формирующими контролируемое распределение КР по ступеням. Такой подход моделирует типичную ситуацию эксплуатации АВО газа, когда геометрически одинаковые секции демонстрируют различную тепловую эффективность вследствие неодинаковой степени загрязнения, неравномерности обдува, частичных засорений воздушного тракта и других эксплуатационных факторов. Введение неоднородных значений КР позволяет моделировать реалистичное распределение тепловых нагрузок вдоль секций и тем самым проверить устойчивость интегрального метода при условиях, существенно отличающихся от идеализированной равномерной схемы охлаждения, принятой при допущениях. Для сравнения методов рассмотрим 3 варианта распределения локальных КР по секциям:

- 1) вариант 1:  $\eta_i=0,1;0,2;0,3;0,4$  (шаг 0,1);
- 2) вариант 2:  $\eta_i=0,1;0,3;0,5;0,7$  (шаг 0,2);
- 3) вариант 3:  $\eta_i=0,1;0,35;0,6;0,85$  (шаг 0,25).

Для интегрального метода КР средний по секциям и общий КР определяется как:

$$\eta_{\text{ср}} = \frac{1}{4} \cdot \sum_{i=1}^4 \eta_i; \eta_{\text{общ,интегр}} = 1 - (1 - \eta_{\text{ср}})^4. \quad (14)$$

Тогда для метода  $NTU$ :

$$\eta_{\text{общ,NTU}} = 1 - \prod_{i=1}^4 (1 - \eta_i). \quad (15)$$

Ошибка между методами:

$$\Delta = \eta_{\text{общ,интегр}} - \eta_{\text{общ,NTU}}; \delta = \frac{\Delta}{\eta_{\text{общ,NTU}}} \cdot 100\%. \quad (16)$$

Результаты расчетов представлены в таблице 1.

Таблица 1

Table 1

Сравнение интегрального метода и  $NTU$ -модели при различных КР по секциям

Comparison of the integral method and  $NTU$  model at different regeneration rates for sections

Вариант	$\eta_i$	$\eta_{\text{ср}}$	$\eta_{\text{общ,NTU}}$	$\eta_{\text{общ,интегр}}$	$\Delta$	$\delta, \%$
1	0,1; 0,2; 0,3; 0,4	0,250	0,698	0,684	-0,014	-2,0
2	0,1; 0,3; 0,5; 0,7	0,400	0,906	0,870	-0,035	-3,9
3	0,1; 0,35; 0,6; 0,85	0,475	0,965	0,924	-0,041	-4,2

\*Источник: составлено авторами. Source: compiled by the authors.

Проведённый анализ секций показал, что интегральный метод демонстрирует высокую устойчивость к изменению тепловых характеристик секций. Несмотря на существенную разницу между КР отдельных секций, общее расхождение между интегральным показателем и методом  $NTU$  составляет 2-4 %. Это свидетельствует о том, что интегральная модель корректно усредняет влияние неоднородности и обеспечивает реалистичную оценку суммарной эффективности многосекционного теплообменного

аппарата. Результаты показывают, что при умеренном распределении КР (0,10-0,40) интегральный метод практически совпадает с методом NTU, а при существенном разбросе (0,10-0,70 и 0,10-0,85) наблюдаемое отклонение не превышает типичных эксплуатационных погрешностей измерений температуры, что адекватно отражает изменение общего КР теплообменного аппарата. Полученные результаты подтверждают, что интегральный метод может использоваться не только для идеализированной равномерной структуры секций, но и для анализа реальных установок охлаждения газа с различной степенью загрязнённости и неодинаковой тепловой нагрузкой.

Важным фактором, влияющим на точность модели теплообменного аппарата, является отношение теплоёмкостей потоков  $s$  (13). Для АВО газа с перекрёстным током (11) величина  $s$  определяет, какая из сторон аппарата ограничивает перенос теплоты, и существенно влияет на эффективность, получаемую по NTU-методу. В АВО газа значение  $s$  изменяется в широких пределах в зависимости от расхода воздуха, степени его нагрева, режима работы вентиляторов и текущего состояния воздушного тракта. Поэтому даже одинаковые секции из одной установки могут демонстрировать разные значения эффективности при идентичной геометрии. Чтобы учесть эту физическую особенность, в работе дополнительно проведено сравнение интегрального показателя и NTU-метода для различных значений  $s$ . Такой подход позволяет количественно оценить, как изменение теплоёмкости холодного потока влияет на точность приближения интегрального метода, и определить диапазон условий, при которых он остаётся согласованным с NTU-моделью. Это также даёт возможность проверить, насколько устойчив интегральный показатель к вариациям теплофизических параметров и может ли он корректно описывать реальные эксплуатационные режимы, где  $s$  не является постоянным и меняется от секции к секции.

Чтобы воспроизвести такую ситуацию в численном анализе, были рассмотрены различные значения  $s$  с использованием опытно-экспериментальных данных для АВО газа типа 2АВГ-75С (табл.2) [17].

Таблица 2  
Table 2

Теплотехнические характеристики АВО газа типа 2АВГ-75  
*Thermal characteristics of 2AVG-75 gas air cooling apparatus*

Параметр	Показатель	Размерность	Значение
коэффициент теплопередачи	$U$	Вт/(м <sup>2</sup> ·К)	16
площадь теплообмена для одной секции	$A$	м <sup>2</sup>	4969
теплоемкость газа	$c_{газ}$	Дж/(кг·К)	2200
массовый расход газа	$G_{газ}$	кг/с	50

\*Источник: составлено авторами. Source: compiled by the authors.

Используя выражения (11) и (12), выполним сравнение интегрального и NTU метода на основе экспериментальных данных при разбросе  $s$  теплообменного аппарата от 0,1 до 0,9 (шаг 0,1) (табл.3).

Таблица 3  
Table 3

Сравнение интегрального метода и NTU-модели при различных отношениях теплоемкостей потоков

*Comparison of the integral methods and NTU model for different heat capacity ratios of the flows*

$s$	$\eta_{i,интегр}$	$\eta_{общ,интегр}$	$\eta_{i,NTU}$	$\eta_{общ,NTU}$	$\delta, \%$
0,1	0,515	0,945	0,502	0,939	0,6
0,2			0,488	0,931	1,5
0,3			0,476	0,925	2,2
0,4			0,463	0,917	3,1
0,5			0,451	0,909	4,0
0,6			0,440	0,902	4,8
0,7			0,428	0,893	5,8
0,8			0,416	0,884	6,9
0,9			0,405	0,875	8

\*Источник: составлено авторами. Source: compiled by the authors.

Проведённое сравнение показало, что влияние отношения теплоёмкостей потоков  $s$  существенно отражается на эффективности теплообмена, рассчитанной по NTU-методу, однако интегральный показатель демонстрирует высокую устойчивость к изменению этого параметра, несмотря на то, что исходно он основан на упрощённом предположении о малой

теплоёмкости холодного потока. Полученные расчёты показывают, что различия между двумя подходами растут умеренно и остаются в пределах 10 %, что сопоставимо с реальными эксплуатационными параметрами расхода воздуха и неизбежными погрешностями измерений температур. Это говорит о том, что интегральный показатель сохраняет свою работоспособность при существенно неодинаковых режимах работы теплообменного аппарата и корректно отражает изменение общего КП при увеличении или уменьшении отношения теплоемкостей газа и воздуха, особенно в тех случаях, когда параметры воздушного потока изменяются во времени или недоступны для точного определения в реальных условиях эксплуатации.

*Аналитическая аппроксимация паспортной лучевой характеристики АВО газа*

Для оценки теплотехнических параметров АВО газа типа 2АВГ-75 в качестве исходной информации использована лучевая паспортная номограмма, отражающая зависимость тепловой нагрузки аппарата от расхода охлаждаемого газа и температурного напора и служащая базовым источником заводских данных, применяемых при проектировании и эксплуатации АВО газа (рис.3).

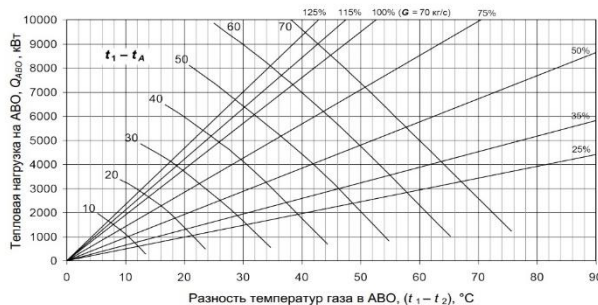


Рис.3. Паспортные теплотехнические характеристики АВО газа типа 2АВГ-75С (два вентилятора в работе)

\*Источник: [17] Source: [17].

Паспортная лучевая номограмма представлена в графическом виде, что затрудняет точное считывание данных и не позволяет использовать её в расчётных моделях и оптимизационных алгоритмах. Для дальнейшего количественного анализа паспортной теплотехнической характеристики АВО типа 2АВГ-75 выполнено извлечение контрольных точек с лучевой номограммы, представленной в заводской документации. Оцифрованные значения были приведены к безразмерной форме через относительный расход газа ( $g = G/G_{ном}$ ) и КП ( $\eta$ ). С целью выбора наиболее адекватной математической зависимости  $\eta(g)$  была проведена аппроксимация полученных данных с помощью полиномиальной, экспоненциальной, степенной зависимостями в программном комплексе MS Excel. Для каждой модели рассчитан коэффициент детерминации  $R^2$ , характеризующий степень соответствия аппроксимирующей функции паспортным данным, и осуществлен анализ поведения функции КП при различных диапазонах расхода газа ( $g \in [0;1,5]$ ). Результаты сравнительного анализа представлены в таблице 4.

Таблица 4  
Table 4

Сравнение моделей аппроксимации с паспортной лучевой теплотехнической характеристикой АВО газа типа 2АВГ-75С  
*Comparison of approximation models with the passport radiation thermal characteristics of the 2AVG-75S gas air cooling apparatus*

Вид функции	Уравнение, $\eta=f(g)$	$R^2$	Расход $g=0,25 \dots 1,25$	Расход $g<0,25$	Расход $g>1,25$
кусочно-линейная интерполяция	$\eta_i + \frac{\eta_{i+1} - \eta_i}{g_{i+1} - g_i} (g - g_i)$	1	имеет изломы между узлами	$\eta > 1$	МОНОТОННО убывающая
полином 2-я степень	$0,1221g^2 - 0,5886g + 1,1457$	0,9940	слабое расхождение	$\eta > 1$	

Вид функции	Уравнение, $\eta=f(g)$	$R^2$	Расход $g=0,25\dots 1,25$	Расход $g<0,25$	Расход $g>1,25$
кусочно-линейная интерполяция	$\eta_i + \frac{\eta_{i+1} - \eta_i}{g_{i+1} - g_i} (g - g_i)$	1	имеет изломы между узлами	$\eta > 1$	монотонно убывающая
полином 3-я степень	$0,06326 g^3 - 0,02026 g^2 - 0,49419 g + 1,12830$	0,9941		$\eta > 1$	
степенная	$0,6730 g^{-0,3241}$	0,9504	сильное расхождение	При $g \rightarrow 0$ $\eta \rightarrow \infty$	
экспоненциальная	$1,1429 e^{-0,5176 g}$	0,9938	слабое расхождение	$\eta > 1$	

\*Источник: составлено авторами. Source: compiled by the authors.

В рабочем диапазоне  $g=0,25\dots 1,25$  все рассмотренные зависимости демонстрируют монотонное снижение тепловой эффективности с ростом расхода газа. Кусочно-линейная интерполяция точно воспроизводит паспортные точки, но имеет изломы в узлах. Полиномиальные зависимости обеспечивают гладкое представление характеристики; полином третьей степени лучше описывает кривизну паспортной зависимости при сохранении монотонности в рабочем диапазоне, что делает его предпочтительным для дальнейших расчётов. Вне диапазона исходных данных ( $g<0,25$  и  $g>1,25$ ) все зависимости являются экстраполяцией и не рассматриваются как количественно достоверные; в этих областях возможны нетипичные значения ( $\eta>1$ ), поэтому экстраполяция используется только для качественной иллюстрации поведения функции.

Анализ результатов аппроксимации показал, что наилучшее согласование с паспортной лучевой номограммой обеспечивает полиномиальная регрессионная модель третьей степени по критерию коэффициента детерминации  $R^2$  и поведению функции КР в рабочем диапазоне:

$$\eta_{\text{паспорт}}(g) \approx 0,06326 \cdot g^3 - 0,02026 \cdot g^2 - 0,49419 \cdot g + 1,12830. \quad (17)$$

Для аппарата типа 2АВГ-75 в номинальном режиме при температуре газа на входе  $T_{\text{вх}}=75^\circ\text{C}$ , на выходе  $T_{\text{вых}}=45^\circ\text{C}$ , температуре воздуха  $T_{\text{возд}}=30^\circ\text{C}$ , номинальном расходе газа  $G=54,4$  кг/с ( $G=70$  кг/с максимальный расход), паспортная тепловая нагрузка составляет не менее 4400 кВт, что соответствует КР=0,667 (рис.3). При подстановке в (17) номинального значения расхода газа, паспортный КР ( $\eta_{\text{паспорт}}(g)$ )  $\approx 0,677$ , что говорит о хорошей сходимости паспортной характеристики ( $\delta \approx 1,5\%$ ) с подобранной аппроксимацией (регрессионной моделью) в номинальном диапазоне режима работы теплообменного аппарата (табл.5).

Таблица 5

Table 5

Значения паспортного коэффициента регенерации при различных расходах газа  
Values of the rated regeneration coefficient at different gas flows

Относительный расход, $g = G / 54,4$	Фактический расход, $G, \text{кг/с}$	$\eta (g)$
0,3	16,32	0,979
0,4	21,76	0,931
0,5	27,2	0,884
0,6	32,64	0,838
0,7	38,08	0,794
0,75	40,8	0,773
0,8	43,52	0,752
0,9	48,96	0,713
1	54,4	0,677
1,15	62,56	0,629
1,25	68	0,602

\*Источник: составлено авторами. Source: compiled by the authors.

Для анализа адекватности описания теплообменных процессов предложенной регрессионной модели на рис.4. приведены зависимости  $\eta(g)$  (кусочно-линейная интерполяция и полином третьей степени) и нормированной тепловой мощности  $Q(g)$ .

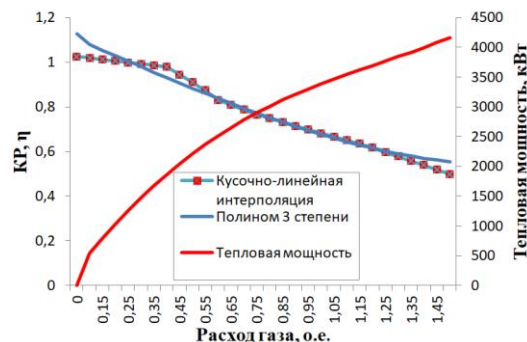


Рис.4. Сопоставление температурной эффективности охлаждения (КР), аппроксимированной полиномом третьей степени, и тепловой мощности аппарата при изменении относительного расхода газа.

\*Источник: составлено авторами. Source: compiled by the authors.

Анализ аппроксимации показывает, что при малых расходах газа температурная эффективность охлаждения близка к единице, однако тепловая мощность аппарата остаётся незначительной вследствие малой теплоёмкости газового потока, что ограничивает практическую значимость данных режимов. При дальнейшем увеличении расхода наблюдается снижение  $\eta(g)$ , что соответствует физическим ограничениям процесса теплообмена. Это объясняется выходом теплообменного аппарата на режим, при котором дальнейшее увеличение расхода газа приводит к снижению времени контакта и не сопровождается ростом коэффициента теплоотдачи со стороны воздуха. Полученные зависимости полностью согласуются с классической теорией теплообмена, и не противоречат форме паспортной номограммы.

Если выразить из выражения (6) локальный паспортный КР для одной секции будет равен:

$$\eta_{\text{паспорт1}}(g) = 1 - \sqrt{1 - \eta_{\text{паспорт}}(g)} \approx 0,4229. \quad (18)$$

Тогда общий паспортный КР для схемы двухступенчатого охлаждения (если принять, что все секции одинаковые) при применении интегрального показателя будет равен:

$$\eta_{\text{паспорт.общ}}(g) = 1 - (1 - 0,4249)^4 = 0,889. \quad (19)$$

При сопоставлении с табл.3 относительная погрешность КР между паспортным и рассчитанным методом NTU в диапазоне теплоемкостей потоков (0,5...0,9) составит не более 7 % для одной секции и 2 % для четырех секций. Повышенные значения относительной погрешности при малых теплоёмкостях потоков (0,1...0,4) объясняются малой величиной теплового эффекта и сопоставимостью абсолютных погрешностей измерений с измеряемыми величинами. Данный эффект носит методический характер и не влияет на выводы, полученные в рабочем диапазоне расходов. Следовательно, применение интегральной модели позволяет формировать обобщённую характеристику многоступенчатой системы охлаждения газа с помощью регрессионной модели, полученной на основе паспортной лучевой характеристики АВО газа с допустимой степенью точности.

#### Интегральный критерий теплотехнического состояния АВО газа

Для количественной оценки теплотехнического состояния теплообменного оборудования традиционно применяется классический безразмерный критерий  $K_{тс}$ , основанный на сравнении фактической и эталонной паспортной эффективности охлаждения (тепловой нагрузки):

$$K_{тс} = \frac{\eta_{\text{факт}}}{\eta_{\text{паспорт}}} = \frac{Q_{\text{факт}}}{Q_{\text{паспорт}}}. \quad (20)$$

Использование критерия (20) ограничено рядом факторов:

- 1) оценка теплотехнического состояния в одной точке измерения;

2) не учитывается многоступенчатая структура теплообменного аппарата, включающего последовательно работающие секции;

3) не позволяет восстановить теплотехническое состояние отдельной секции по измеренной эффективности многоступенчатой системы охлаждения.

Для устранения ограничений и получения более полной оценки параметров работы АВО газа предлагается ввести усовершенствованный диагностический подход, основанный на сопоставлении регрессионной модели (19), определяемой по паспортной лучевой характеристике АВО газа, с интегральным коэффициентом (6), учитывающим реальные условия эксплуатации, позволяющий ввести новый интегральный критерий теплотехнического состояния одного аппарата:

$$K(g) = \frac{\eta_{\text{общ}}}{\eta_{\text{паспорт}}(g)}. \quad (21)$$

Критерий (21) учитывает паспортную зависимость эффективности от расхода и обеспечивает корректное сравнение фактического и номинального режимов в реальных условиях эксплуатации. Для анализа состояния отдельной секции аппарата предлагается ввести секционный диагностический показатель, основанный на восстановлении эффективности секции по измеренным параметрам аппарата:

$$K_{\text{сек}}(g) = \frac{\eta_{\text{сек}}}{\eta_{\text{паспорт1}}(g)} = \frac{1 - \sqrt[3]{(1 - \eta_{\text{общ,интегр}})}}{1 - \sqrt[3]{1 - \eta_{\text{паспорт}}(g)}}. \quad (22)$$

Выражение (22) представляет собой интегральный критерий теплотехнического состояния секции для многоступенчатой схемы охлаждения газа. Диапазон возможных значений  $K_{\text{сек}}(g)$  показывает степень отклонения теплопередающей способности от номинальных параметров, что позволяет выделить нормальный, переходный и критический режимы работы оборудования. Произведем анализ чувствительности критерия теплотехнического состояния для одной секции, одного аппарата (2 секции), двух аппаратов (4 секции, схема двухступенчатого охлаждения) (табл.6).

Таблица 6

Table 6

Влияние снижения эффективности секции на коэффициент теплотехнического состояния

*The effect of reducing the efficiency of a section on the coefficient of thermal condition*

Снижение эффективности секции, %	Одна секция, $K_{\text{сек}}$	Один аппарат, $K_2$	Два аппарата, $K_4$
5	0,95	0,963	0,981
10	0,90	0,924	0,959
15	0,85	0,884	0,935
20	0,80	0,843	0,909
25	0,75	0,800	0,880
30	0,70	0,756	0,849
35	0,65	0,711	0,814
40	0,60	0,664	0,776

\*Источник: составлено авторами. Source: compiled by the authors.

Проведённый расчёт показал, что при последовательном включении секций эффективность аппарата или группы аппаратов становится менее чувствительной к снижению эффективности отдельной секции. Даже при значительном падении КП одной секции (20 %) суммарный критерий для двух аппаратов остаётся близким к единице, что приводит к искажённой оценке реального состояния оборудования. Для корректной оценки состояния оборудования предлагается ввести калибровку пороговых значений критериев, основанную на сопоставлении их с одинаковыми уровнями падения эффективности секций (22), что позволит перейти к единой шкале чувствительности. Предлагаемая интерпретация критерия (22), представленная в табл.7, может служить основанием для принятия решений о необходимости очистки, диагностики или корректировки режимов функционирования АВО газа с учетом предлагаемой идентификации критерия теплотехнического состояния по шкалам чувствительности.

Предлагаемая калибровка пороговых значений критерия позволит обеспечить корректное диагностирование состояния отдельных секций и всего аппарата, повысить информативность критерия и сделать возможной своевременную идентификацию начала снижения теплотехнической эффективности в АВО газа.

Идентификация критерия теплотехнического состояния по шкалам чувствительности  
*Identification of the thermal condition using sensitivity scales*

Уровень состояния	Одна секция, $K_{сек}$	Один аппарат, $K_2$	Два аппарата, $K_4$	Характеристика
норма (чистое состояние)	$K_{сек} \geq 0,9$	$K_2 \geq 0,93$	$K_4 \geq 0,96$	потеря эффективности секции $\leq 10\%$ , теплопередача близка к паспортной
умеренное загрязнение	$0,8 \leq K_{сек} \leq 0,9$	$0,85 \leq K_2 \leq 0,93$	$0,91 \leq K_4 \leq 0,96$	ориентировочно 10–20 % падение эффективности секции, требуется плановая очистка
существенное загрязнение	$0,7 \leq K_{сек} \leq 0,8$	$0,78 \leq K_2 \leq 0,85$	$0,85 \leq K_4 \leq 0,91$	ориентировочно 20–30 % падение эффективности секции, заметное ухудшение теплообмена
сильное загрязнение / дефект	$K_{сек} < 0,7$	$K_2 < 0,78$	$K_4 < 0,85$	потеря эффективности секции $> 30\%$ , требуется срочная очистка и диагностика

\*Источник: составлено авторами. Source: compiled by the authors.

*Коэффициент минимального эквивалентного числа работающих слоев*

Анализ графика (рис.2) показал, что наибольшую долю тепловой нагрузки берет на себя первый по ходу движения газа вентилятор в секции. Обозначим все первые секции АВО газа по ходу движения газа как первый слой, все вторые секции по ходу движения как второй слой и т.д. (рис.5).

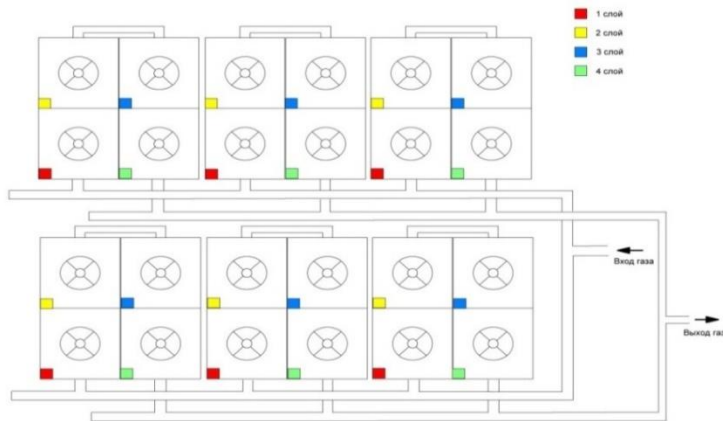


Рис.5. Принцип послойного распределения тепловой нагрузки для двухступенчатой схемы АВО газа  
 Fig.5. Layer-by-layer distribution principle for a two-stage gas AVO scheme

\*Источник: составлено авторами Source: compiled by the authors.

Сравним, при каком условии тепловая нагрузка от четырех слоев будет эквивалентна нескольким первым слоям АВО газа.

Схема №1: двухступенчатая схема охлаждения, где задействованы слои 1-2-3-4 последовательно. Тогда по (6):

$$\eta_{общ} = 1 - (1 - \eta)^4 \tag{23}$$

Тепловая нагрузка из (10):

$$Q_{режим} = 1 - (1 - \eta)^4 \cdot G_{газ} \cdot c_{газ} \cdot (t_{вх} - t_{ос}) \tag{24}$$

Схема №2: двухступенчатая схема охлаждения, где включены по первому слою в нескольких теплообменных аппаратах:

$$Q_{2режим} = w_1 \cdot \eta \cdot G_{газ} \cdot c_{газ} \cdot (t_{вх} - t_{ос}) \tag{25}$$

где  $w_1$  – количество эквивалентно работающих первых слоев по тепловой нагрузке.

Тогда условие равенства тепловых нагрузок при двух схемах работы примет вид:

$$Q_{1режим} = Q_{2режим} \tag{26}$$

Подставляя (23) и (25) и сокращая множитель (расход газа одинаков) получим:

$$1 - (1 - \eta)^4 = w_1 \cdot \eta \rightarrow w_1 = \frac{1 - (1 - \eta)^4}{\eta} . \quad (27)$$

Учитывая, что число вентиляторов не может быть дробным, то округлим в сторону большего числа для обеспечения необходимого запаса по охлаждению. Получим коэффициент минимального эквивалентного числа первых слоев, необходимых для достижения тепловой нагрузки, равной тепловой нагрузке четырех слоев, работающих последовательно в одном АВО:

$$w_{\min} = \left\lceil \frac{1 - (1 - \eta)^4}{\eta} \right\rceil . \quad (28)$$

Построим график, согласно (28) при различных значениях эффективности (рис.6).

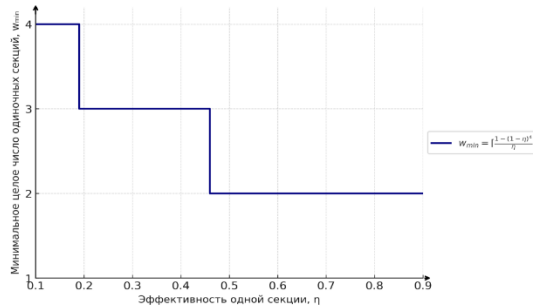


Рис.6. Зависимость  $w_{\min}$  от эффективности одной секции  $\eta$  Fig.6. Dependence of  $w_{\min}$  on the efficiency of one section  $\eta$

\*Источник: составлено авторами Source: compiled by the authors.

Анализ графика показывает ступенчатый характер изменения количества первых слоев от индивидуальной эффективности слоя. При увеличении индивидуальной эффективности слоя доля тепловой нагрузки, обеспечиваемая каждой из них, возрастает, что приводит к уменьшению требуемого числа одновременно работающих вентиляторов в первых слоях с эквивалентным тепловым эффектом от четырех последовательно включённых слоев.

Для качественной и количественной оценки зависимости требуемого числа одновременно работающих первых слоев от их индивидуальной эффективности был рассчитан коэффициент минимального числа первых слоев, обеспечивающий эквивалентную тепловую нагрузку для четырех последовательных слоев, и определен режим работы системы охлаждения (табл.8).

Таблица 8  
Table 8

Характеристика режима работы для двухступенчатой схемы охлаждения при послойном управлении электроприводами АВО газа  
Characteristics of the operating mode for a two-stage cooling scheme with layer-by-layer control of the AVO gas electric drives

№	Эффективность слоя, $\eta$	Количество первых слоев, $w_{\min}$	Характеристика режима
1	0,1	4	низкая эффективность
2	0,15	4	
3	0,20	3	переходный режим
4	0,30	3	средний режим
5	0,4	3	оптимальный переходный режим
6	0,5	2	энергосберегающий режим
7	0,6	2	устойчивый эффективный режим
8	0,7	2	
9	0,8	2	
10	0,9	2	

\*Источник: составлено авторами. Source: compiled by the authors.

Для оценки диапазона эффективности слоёв, при котором возможно снижение числа включённых вентиляторов без ухудшения тепловых характеристик системы,

построена контурная диаграмма зависимости общей эффективности системы охлаждения от эффективности отдельного слоя при фиксированном числе АВО газа (рис.7).

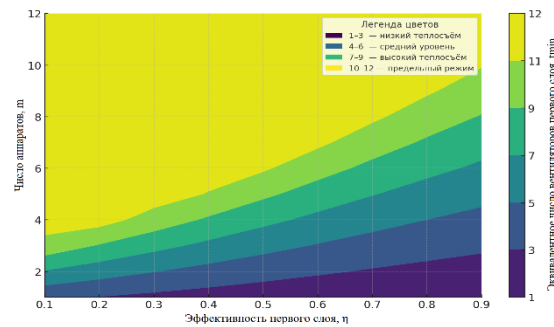


Рис.7. Контурная диаграмма эффективности системы охлаждения при различной эффективности первого слоя и числе АВО газа

\*Источник: составлено авторами Source: compiled by the authors.

На основании анализа контурной диаграммы установлено, что эффективность системы воздушного охлаждения газа определяется сочетанием высокой эффективности секций и рационального числа задействованных аппаратов. При этом достижение зоны насыщения указывает на необходимость оптимизации схемы включения вентиляторов и переходу к послойному управлению, что позволит уменьшить число включённых электроприводов без потери тепловой мощности.

*Оптимизация режима работы АВО газа по критерию минимума включенных вентиляторов*

Цель оптимизации заключается в определении такого количества включённых вентиляторов, которые обеспечивают требуемую суммарную тепловую нагрузку на установке охлаждения газа (УОГ) при минимальном числе работающих слоев АВО газа.

КР  $i$ -ого последовательного слоя в одном аппарате, согласно (6) и (10) определяется:

$$\Delta\eta_i = (1 - \eta)^{i-1} \cdot \eta, \text{ где } i=1,2,3,4 \quad (29)$$

КР последовательно включенных слоев в одном аппарате:

$$\eta_{\text{общ}} = 1 - (1 - \eta)^4 = \sum_{i=1}^4 \Delta\eta_i \quad (30)$$

Тогда эффективность  $j$ -го АВО газа определяется как:

$$E_j = \sum_{i=1}^4 \Delta\eta_i \cdot x_{j,i}, \quad j=1, \dots, U \quad (31)$$

$$x_{j,i} \in \{0,1\} \quad (32)$$

где  $x_{j,i}$  – бинарная переменная, характеризующая состояние (включен/выключен)  $i$ -ого вентилятора в  $j$ -ом аппарате;  $U$  – количество одинаковых АВО газа на УОГ.

При этом должно выполняться условие, где включение последующих слоев в аппарате возможно только при работе предшествующего слоя:

$$x_{j,i} \leq x_{j,i-1}, \quad i = 2,3,4 \quad (33)$$

Требуемая эффективность АВО газа, где включение происходит по слоям можно привести к виду:

$$E_{\text{треб}} = \sum_{j=1}^U \sum_{i=1}^4 \Delta\eta_i \cdot x_{j,i} = y_1 \cdot \Delta\eta_1 + y_2 \cdot \Delta\eta_2 + y_3 \cdot \Delta\eta_3 + y_4 \cdot \Delta\eta_4, \quad (34)$$

где  $y_1, y_2, y_3, y_4$  – количество включенных слоев.

Цель оптимизации обеспечить минимальное число включенных вентиляторов с учетом вклада слоя по заданному тепловому режиму (эффективности) УОГ со следующими ограничениями:

$$N_{\text{вент}} = \sum_{j=1}^U \sum_{i=1}^4 x_{j,i} = y_1 + y_2 + y_3 + y_4 \rightarrow \min, \quad (35)$$

$$E_{\text{треб}} \geq E_{\text{зад}}, \quad (36)$$

$$y_1 \geq y_2 \geq y_3 \geq y_4, \quad (37)$$

$$0 \leq y_i \leq U, \quad (38)$$

$$y_i \in N, \quad (39)$$

где  $E_{зад}$  – заданная эффективность УОГ,  $y_i$  – номер слоя,  $N$  – множество натуральных чисел.

Заданная эффективность УОГ определяется:

$$E_{зад} = U \cdot \eta_{общ}. \quad (40)$$

*Оптимизация режима работы АВО газа по критерию минимума отклонения от требуемой эффективности*

При дискретном управлении вентиляторами включение только секций первого слоя может привести к резкому превышению заданной эффективности охлаждения. Для плавного приближения к заданному значению эффективности (температуры) необходимо использовать переход на последующие слои, которые, согласно (24), вносят меньшую тепловую нагрузку. С учётом необходимости ограничения переохлаждения газа (верхняя граница) условие (31) необходимо дополнить следующим:

$$E_{зад} + \Delta E_{\delta} \geq E_{треб} \geq E_{зад}, \quad (41)$$

где  $\Delta E_{\delta}$  – максимально допустимое превышение требуемой эффективности, которое может быть определено как:

$$\Delta E_{\delta} = \frac{\Delta T_{\delta}}{T_{вх} - T_{ос}}, \quad (42)$$

где  $\Delta T_{\delta}$  – максимально допустимое превышение температуры (переохлаждение).

Отклонение эффективности охлаждения можно определить как:

$$R = E_{зад} - E_{тек}, \quad (43)$$

где  $E_{тек}$  – текущая суммарная эффективность включенных вентиляторов.

Выражение (43) при  $R > 0$  показывает, что охлаждение недостаточно,  $R = 0$  эффективность достигнута,  $R < 0$  охлаждение избыточно.

Цель оптимизации обеспечить минимум отклонения от требуемой эффективности:

$$|E_{зад} - E_{тек}| \rightarrow \min. \quad (44)$$

Чтобы обеспечить плавное приближение к требуемой эффективности без скачков температуры необходимо осуществить переход между слоями. Эффективность с учетом вклада слоев будет равна:

$$E_i = E_{тек} + \Delta \eta_i, \quad (45)$$

$$E_{i+1} = E_{тек} + \Delta \eta_{i+1}. \quad (46)$$

Тогда ошибка между полученной эффективностью и заданной определяется как:

$$\delta_i = |E_{зад} - E_i|, \quad (47)$$

$$\delta_{i+1} = |E_{зад} - E_{i+1}|. \quad (48)$$

Подставив в (47) выражение (45), и аналогично для (48) и (46) с учетом (43) получим:

$$\delta_i = |R - \Delta \eta_i|, \quad (49)$$

$$\delta_{i+1} = |R - \Delta \eta_{i+1}|. \quad (50)$$

Учитывая, что шаг ошибки для последующих слоев меньше чем предыдущих, получим:

$$|R - \Delta \eta_{i+1}| \geq |R - \Delta \eta_i|. \quad (51)$$

Решая неравенство (51) получим выражение, которое является условием перехода на следующий слой:

$$R \leq \frac{\Delta \eta_i + \Delta \eta_{i+1}}{2}. \quad (52)$$

Условие (52) обеспечивает минимальное отклонение от требуемой температуры газа и плавное регулирование без переохлаждения.

*Количественная оценка энергосберегающего эффекта предлагаемого алгоритма*

Для демонстрации практической значимости разработанного алгоритма послойного дискретного управления электроприводами АВО газа выполнена расчётная оценка снижения энергопотребления в сравнении с исходной двухступенчатой схемой охлаждения газа. В соответствии с ранее полученными зависимостями интегрального коэффициента регенерации и коэффициента минимального эквивалентного числа слоёв (табл. 8) установлено, что при известной эффективности секции эквивалентная тепловая нагрузка четырёх последовательных слоёв достигается при работе  $w_{\text{мин}}$  слоёв.

В исходной схеме при достижении исходной тепловой нагрузки задействуются четыре последовательно работающих асинхронных двигателей (АД):

$$P_{\text{исх}} = 4 \cdot P_{\text{АД}}, \quad (53)$$

где  $P_{\text{АД}}$  – мощность АД.

Оптимизированный послойный алгоритм требует работы количества АД вентиляторов:

$$P_{\text{опт}} = w_{\text{мин}} \cdot P_{\text{АД}}. \quad (54)$$

Тогда снижение установленной мощности составляет:

$$\Delta P = P_{\text{баз}} - P_{\text{опт}}. \quad (55)$$

Относительная экономия энергии в данном режиме равна:

$$\eta_{\text{э}} = \frac{P_{\text{баз}} - P_{\text{опт}}}{P_{\text{баз}}} \cdot 100\%. \quad (56)$$

Пусть длительность работы аппарата в данном тепловом режиме составляет  $T$  часов в год. Тогда годовая экономия электроэнергии рассчитывается как:

$$\Delta W = \Delta P \cdot T. \quad (57)$$

При оценке энергосберегающего эффекта были выбраны режимы работы, соответствующие типовой эксплуатации АВО газа на газотранспортных объектах. В расчётах установлена двухступенчатая схема охлаждения газа с электродвигателями мощностью 37 кВт и рабочими колёсами ГАЦ-50-4М2, что характерно для применяемых на практике аппаратов типа 2АВГ-75. В соответствии с формулами (53-57) произведем оценку при исходной и послойной схеме управления АВО газа. Для количественной оценки энергосберегающего эффекта были выбраны два характерных режима работы АВО газа. Выбор именно этих режимов обусловлен как теплотехническими особенностями установки, так и практическими условиями её эксплуатации. В первом режиме наблюдается наибольший потенциал для энергосбережения, так как в свою очередь второй режим работы характерен для большой доли реальных рабочих состояний АВО газа, особенно при умеренной температуре наружного воздуха и нестабильных суточных тепловых потоках. Этот диапазон представляет собой переходную область, в которой каждый включённый слой даёт заметный тепловой эффект, однако эффективность использования вентиляторов всё ещё далека от насыщения. Именно поэтому в данном режиме послойный алгоритм обеспечивает более умеренное, но устойчивое снижение энергопотребления (на уровне 20–30 %), отражая реалистичный сценарий эксплуатации оборудования (18-19). Таким образом, рассмотренные режимы охватывают как наиболее энергетически неэффективный участок работы исходной схемы, так и наиболее часто встречающийся рабочий диапазон, что позволяет корректно и объективно оценить энергетическую эффективность предложенного алгоритма в двух принципиально разных условиях эксплуатации АВО газа (табл. 9).

Таблица 9

Table 9

Оценка энергосбережения при исходном и послойном управлении АВО газа

*Evaluation of energy savings in traditional and layer-by-layer control of gas air cooling apparatus*

Режим работы	Эффективность слоя, $\eta$	Число вентиляторов (исходная схема)	Число вентиляторов (послойная схема)	Потребляемая мощность исходной схемы, кВт	Потребляемая мощность послойной схемы, кВт	Относительное снижение мощности, %	Годовая экономия, кВт·ч/год
1	0,5	4	2	148	74	50	444000
2	0,4		3		111	25	222000

\*Источник: составлено авторами. Source: compiled by the authors.

*Сравнение существующих методов управления АВО газа с предложенным алгоритмом*

Анализ литературных источников показывает, что современные методы управления аппаратами воздушного охлаждения газа развиваются в двух основных направлениях: совершенствование дискретных алгоритмов переключения вентиляторов и внедрение интеллектуальных систем регулирования на основе предиктивных и адаптивных подходов. Для корректной оценки эффективности предложенного алгоритма послыонного управления выполнено сравнение его характеристик с методами, описанными в источниках [1, 4-6, 9-11] (табл.10).

В работах [1,9] показано, что традиционное дискретное управление приводит к избыточному числу включённых вентиляторов, поскольку переключения выполняются по фиксированным порогам температуры без учёта распределения тепловой нагрузки между секциями. Комбинированные схемы управления обеспечивают сокращение числа пусков и снижение энергопотребления на 10-15 % относительно традиционного алгоритма, однако также не учитывают различия в эффективности отдельных слоёв АВО. Предлагаемый алгоритм использует интегральную теплотехническую модель и позволяет уменьшить среднее число включённых вентиляторов на 20-25 %, а в режимах насыщения тепловой эффективности до 50 %, что превышает значения, достигаемые в работах [1,9].

В исследованиях [4-6] рассматриваются модели предиктивного управления, методы оптимизации расхода воздуха и алгоритмы распределения нагрузки между секциями. Достижимое снижение энергопотребления составляет 15-30 %, при этом обеспечивается повышение точности поддержания температурного режима. Отмечается, что данные методы требуют модернизации оборудования, установки дополнительной измерительной аппаратуры и, в большинстве случаев, применения частотно-регулируемых электроприводов. Предлагаемый в настоящей работе алгоритм обеспечивает сопоставимый энергетический эффект (до 25 % в среднем) без необходимости изменения аппаратной части установки и при сохранении штатного дискретного управления вентиляторов.

В работах [10, 11] улучшение энергетической эффективности достигается за счёт анализа эксплуатационных данных и построения предиктивных моделей функционирования теплообменных аппаратов. Энергосбережение составляет 10-25 %, однако методы требуют накопления значительного объёма данных, вычислительных ресурсов и внедрения дополнительного программного обеспечения. В отличие от этого, предложенный алгоритм опирается на аналитические зависимости (интегральный коэффициент регенерации, NTU-модель) и не требует статистического обучения, что повышает его надёжность и обеспечивает возможность внедрения на объектах с ограниченной информационной инфраструктурой.

Таблица 10

Table 10

Сравнение методов управления АВО газа по критерию энергосбережения

*Comparison of methods for controlling gas air-cooling apparatus based on energy saving criteria*

Метод управления	Необходимость модернизации оборудования	Энергосбережение, %	Основные особенности
традиционное ступенчатое [1]	не требуется	0	простота реализации, низкая гибкость
комбинированное дискретное [1, 9]	минимальная	10–15	уменьшение числа пусков, отсутствие оптимизации по слоям
предиктивные и адаптивные методы [4–6]	высокая	15–30	высокая точность, применение частотно-регулируемого привода и дополнительных датчиков
алгоритмы на основе машинного обучения [10, 11]	высокая	10–25	зависимость от данных, сложность внедрения
предлагаемый алгоритм послыонного управления	не требуется	20–25 %, до 50 % в режимах насыщения	аналитическая модель, применение на существующих системах

\*Источник: составлено авторами. Source: compiled by the authors.

Сравнение показало, что предложенный алгоритм послойного управления обеспечивает энергетический эффект, сопоставимый с интеллектуальными методами регулирования и превосходящий комбинированные дискретные решения, при этом требуя минимальных изменений существующей системы управления. Такое сочетание эффективности и простоты внедрения делает данный подход предпочтительным для объектов, эксплуатирующих нерегулируемые электродвигатели вентиляторов и не имеющих возможности перехода к частотно-регулируемым системам.

*Оптимизация дискретного управления электроприводами АВО газа*

Реализация алгоритма оптимального дискретного управления электроприводами АВО газа сводится к решению двух целевых функций:

$$F_1 = \sum_{j=1}^U \sum_{i=1}^4 x_{j,i} = y_1 + y_2 + y_3 + y_4 \rightarrow \min, \quad (58)$$

$$F_2 = |E_{\text{зад}} - E_{\text{тек}}| \rightarrow \min. \quad (59)$$

Анализ литературных источников [18-21] указывает на то, что решение может быть осуществлено с помощью двух стратегий: последовательной и двухцелевой оптимизации (табл.11). Последовательная (иерархическая) оптимизация основана на поэтапном решении задачи с приоритетом одной целевой функции. В рамках управления системой воздушного охлаждения газа первым этапом минимизируется количество работающих вентиляторов при обеспечении требуемой тепловой нагрузки. После достижения заданного значения эффективности выполняется уточнение решения по второму критерию – минимизации отклонения полученного результата от требуемого уровня эффективности (охлаждения). Такой подход обеспечивает простоту реализации в системах дискретного управления, однако может приводить к скачкообразным изменениям температуры и увеличению риска переохлаждения при малом запасе по эффективности. В отличие от последовательного подхода, двухцелевая (многокритериальная) оптимизация рассматривает обе цели одновременно. Оптимизация направлена на нахождение компромиссного решения между минимизацией числа работающих вентиляторов и минимизацией отклонения эффективности охлаждения от требуемого значения. В результате формируется более гибкий и сбалансированный режим работы установки, обеспечивающий стабильность температуры газа и снижение энергопотребления. Для реализации на практике применяется объединённый критерий:

$$F = \alpha \cdot F_1 + \beta \cdot F_2 \rightarrow \min, \quad (60)$$

где  $\alpha$  – весовой коэффициент, отражающий приоритет первой функции;  $\beta$  – весовой коэффициент, отражающий приоритет второй функции.

Критерий (60) в зависимости от весовых коэффициентов может применяться для следующих целей: 1)  $\alpha \ll \beta$  – экономия электрической энергии; 2)  $\alpha \gg \beta$  – стабильность и точность охлаждения.

Таблица 11

Table 11

Сравнительная характеристика последовательной и двухцелевой оптимизации систем управления АВО газа

*Comparative characteristics of sequential and dual-objective optimization of gas air-cooling control systems*

Характеристика	Последовательная оптимизация	Двухцелевая оптимизация
гибкость управления	дискретные шаги	адаптация
энергопотребление	низкое	оптимизированное
область применения	простые системы	адаптивные системы
риск гидратообразования	высокий риск	минимизирован
переход между слоями	резкий	плавный
преимущества	легкая реализация	адаптивность
недостатки	резкие перепады температуры	сложная настройка управления

\*Источник: составлено авторами Source: compiled by the authors.

*Методика выбора весовых коэффициентов объединённого критерия*

В объединённом критерии оптимизации (54) весовые коэффициенты определяют относительную значимость двух целевых функций: минимизации числа включённых вентиляторов и минимизации отклонения эффективности охлаждения. Для исключения произвольности выбора коэффициентов предлагается методика, основанная на

нормировании частных критериев и учёте технологических ограничений. Поскольку критерии  $F_1$  и  $F_2$  имеют различную размерность, они приводятся к безразмерному виду:

$$F_{1\text{отн}} = \frac{F_1 - F_{1,\min}}{F_{1,\max} - F_{1,\min}}, \quad (61)$$

$$F_{2\text{отн}} = \frac{|R|}{R_{\max}}, \quad (62)$$

где  $F_{1,\min}$  – минимальное значение критерия энергопотребления ( $w_{\min}$ );  $F_{1,\max}$  – максимальное значение критерия энергопотребления (максимальное число последовательных вентиляторов в теплообменном аппарате);  $R$  – отклонение эффективности охлаждения;  $R_{\max}$  – максимально допустимое отклонение согласно технологическим требованиям.

Приведение к безразмерному виду обеспечивает корректное сравнение влияния двух критериев. После нормирования объединённый критерий принимает вид:

$$F = \alpha \cdot F_{1\text{отн}} + \beta \cdot F_{2\text{отн}}, \quad (63)$$

$$\alpha + \beta = 1. \quad (64)$$

Выбор весовых коэффициентов определяется эксплуатационными задачами и может быть выражен через относительную важность энергосбережения и стабильности теплового режима через отношение:

$$\frac{\alpha}{\beta} = \frac{z_{\text{вент}}}{z_{\text{откл.тем}}}, \quad (65)$$

где  $z_{\text{вент}}$  – относительная значимость увеличения числа включённых вентиляторов;

$z_{\text{откл.тем}}$  – относительная значимость отклонения температуры охлаждаемого газа.

Тогда выбор коэффициентов, учитывающих реальные условия эксплуатации и обеспечивающих воспроизведение результатов оптимизации из (59) определяется:

$$\alpha = \frac{z_{\text{вент}}}{z_{\text{вент}} + z_{\text{откл.тем}}}, \quad (66)$$

$$\beta = \frac{z_{\text{откл.тем}}}{z_{\text{вент}} + z_{\text{откл.тем}}}, \quad (67)$$

На основе выражений (63, 66-67) предлагаются следующие варианты выбора весовых коэффициентов объединённого критерия (табл. 12).

Таблица 12  
Table 12

Рекомендуемые значения весовых коэффициентов  
Recommended values of weight coefficients

Режим	Описание	$\alpha$	$\beta$
энергосберегающий	приоритет минимизации числа вентиляторов	0,7	0,3
сбалансированный	равный учёт экономичности и точности регулирования	0,5	0,5
температурно-ориентированный режим	приоритет минимизации отклонения эффективности	0,3	0,7

\*Источник: составлено авторами Source: compiled by the authors.

Применение весовых коэффициентов в объединённом критерии оптимизации требует их обоснованного выбора, поскольку эти параметры определяют баланс между энергопотреблением вентиляторов и соблюдением теплотехнических ограничений. Предложенная методика, основанная на нормировании частных критериев и учёте эксплуатационных условий, позволяет задать веса не эмпирически, а в соответствии с

технологическими приоритетами функционирования АВО газа. Разделение режимов по уровням значимости показателей обеспечивает возможность гибкой адаптации алгоритма к различным рабочим ситуациям и предотвращает субъективность при выборе коэффициентов. Тем самым достигается согласованность результатов оптимизации с реальными требованиями эксплуатации без изменения структуры алгоритма управления.

#### **Результаты (Results)**

1. Получено аналитическое выражение для интегральной оценки тепловой эффективности многоступенчатых систем охлаждения газа.

2. Предложена интегрированная методика оценки теплотехнического состояния АВО, объединяющая аналитическую аппроксимацию паспортной характеристики, интегральный диагностический критерий и калиброванные пороговые значения для различных конфигураций аппаратов.

3. Разработан принцип и алгоритм послойного включения вентиляторов, обеспечивающий снижение энергопотребления без потери эффективности охлаждения.

4. Определён коэффициент минимального эквивалентного числа вентиляторов, позволяющий рассчитывать рациональное количество работающих электроприводов.

5. Сформулированы две целевые функции: минимизация числа работающих вентиляторов и минимизация отклонения эффективности охлаждения.

6. Предложен объединённый критерий оптимизации, обеспечивающий компромисс между энергосбережением и стабильностью температурного режима.

7. Предложена методика выбора весовых коэффициентов объединённого критерия оптимизации.

#### **Заключение (Conclusions)**

По результатам исследования разработан комплексный научно-практический подход к повышению энергетической эффективности работы АВО газа, основанный на объединении аналитических теплотехнических моделей, регрессионного анализа паспортных характеристик и оптимальных алгоритмов дискретного управления электроприводов вентиляторов. Проведённый теплотехнический анализ позволил получить аналитическое выражение интегрального коэффициента регенерации для многоступенчатых систем охлаждения. Показано, что интегральная модель обеспечивает высокую точность в сравнении с NTU-методом и устойчива к неоднородности тепловой эффективности секций. Это подтверждает возможность её применения для реальных условий эксплуатации АВО газа, в которых секции обладают различной эффективностью из-за загрязнения и неравномерности теплообмена. Впервые сформирована аналитическая функция паспортной теплотехнической характеристики АВО типа 2АВГ-75С, полученная на основе регрессионной аппроксимации лучевой номограммы. Это обеспечило переход от графического паспортного представления к его строгой математической форме и позволило использовать её в диагностике и оптимизации режимов работы. На основе аналитической зависимости  $\eta(g)$  предложены интегральный критерий теплотехнического состояния аппарата и секционный критерий, позволяющие количественно оценивать отклонения фактической (эксплуатационной) эффективности относительно заводских (паспортных) характеристик для многоступенчатых схем охлаждения газа. Показано, что при последовательном включении секций возникает эффект снижения чувствительности суммарного диагностического показателя, что приводит к недооценке ухудшения теплопередачи. Для устранения этого эффекта разработана система калиброванных порогов для секции, аппарата и группы аппаратов, обеспечивающая единую и физически корректную шкалу оценки состояния. Разработанный алгоритм послойного включения вентиляторов базируется на интегральной модели тепловой нагрузки и позволяет определять минимальное эквивалентное число вентиляторов, обеспечивающих требуемый тепловой режим. Определён коэффициент минимального эквивалентного числа слоёв, позволяющий рационально выбирать конфигурацию включения вентиляторов при сохранении требуемой эффективности охлаждения. Показано, что переход к послойному управлению обеспечивает снижение энергетических затрат по сравнению с существующей схемой управления. Сформулирована двухцелевая постановка задачи оптимизации, включающая минимизацию числа работающих вентиляторов и минимизацию отклонения эффективности охлаждения от заданного технологического режима. Предложен объединённый критерий оптимизации и методика выбора весовых коэффициентов, обеспечивающая получение сбалансированного решения между энергетической эффективностью и стабильностью температурного режима. Проведённое сравнение с существующими методами управления показало, что предложенный алгоритм послойного включения вентиляторов обеспечивает энергетический эффект,

сопоставимый с интеллектуальными системами регулирования, и при этом не требует глубокой модернизации оборудования, в отличие от большинства рассмотренных методов и одновременно остаётся технологически совместимым с существующими системами. Такой баланс делает метод перспективным для практического внедрения на объектах, где применение частотно-регулируемых или машинно-обучающих систем затруднено по техническим или экономическим причинам.

Результаты, полученные в исследовании, формируют комплексный подход к управлению электроприводами вентиляторов АВО газа, который позволяет улучшить энергетические и эксплуатационные показатели установки. Предложенная стратегия обеспечивает:

- 1) сокращение избыточного энергопотребления вентиляторов за счёт более рационального распределения тепловой нагрузки;
- 2) повышение точности и адаптивности регулирования при переменных тепловых режимах;
- 3) учёт фактического теплотехнического состояния секций в процессе управления;
- 4) повышение информативности диагностики теплового состояния оборудования за счёт использования интегральных критериев;
- 5) возможность практического внедрения в действующие системы управления без необходимости модернизации аппаратной части.

Такое сочетание диагностических и управляющих решений позволяет повысить эффективность работы и эксплуатации АВО газа, и обеспечить более устойчивое поддержание технологических параметров при минимальных изменениях существующей инфраструктуры.

#### Литература

1. Абакумов А. М., Кузнецов П. К. Комбинированное управление электроприводами вентиляторов установок охлаждения газа // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2021. Т. 29. № 3(71). С. 67–82. DOI: 10.14498/tech.2021.3.4.
2. Новожилов И. М., Абрамкин С. Е., Мальцев П. А., и др. Разработка системы управления аппаратом воздушного охлаждения масла в составе газоперекачивающего агрегата // Известия СПбГЭТУ ЛЭТИ. 2023. Т. 16. № 2. С. 31–43. DOI: 10.32603/2071-8985-2023-16-2-31-43.
3. Срок службы электродвигателя: анализ эксплуатационных факторов и прогнозирование долговечности [Электронный ресурс] // Образовательный сайт. URL: <https://inner.su/articles/srok-sluzhby-elektrodvigatelya-v-raznykh-usloviyakh-ekspluatatsii.html> (дата обращения: 29.10.2025).
4. Chen X., Guan L., Yang C., et al. A Novel Optimal Control Method for Building Cooling Water Systems with Variable Speed Condenser Pumps and Cooling Tower Fans // Buildings. 2025. Vol. 15. No. 19. DOI: 10.3390/buildings15193568.
5. Chang Q., Huang Y., Liu K., et al. Optimization Control Strategies and Evaluation Metrics of Cooling Systems in Data Centers: A Review // Sustainability. 2024. Vol. 16. No. 16.
6. Luo Z., Yao Q. Multi-Model-Based Predictive Control for Divisional Regulation in the Direct Air-Cooling Condenser // Energies. 2022. Vol. 15. No. 13. DOI: 10.3390/en15134803.
7. Шальгин А. В., Фетисов В. Г., Карякина И. В. Исследование работы аппарата воздушного охлаждения в системе магистрального газопровода // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. 2023. № 2. С. 29–32. DOI: 10.24412/0131-4270-2023-2-29-32.
8. Захаров П. А., Крюков О. В. Принципы инвариантного управления электроприводами газотранспортных систем при случайных возмущениях // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2008. № 2. С. 98–103.
9. Зубков Ю. В., Абакумов А. М., Абакумов О. А. Оптимизация алгоритмов комбинированного управления электроприводами установок охлаждения природного газа // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2024. Т. 32. № 2(82). С. 103–118. DOI: 10.14498/tech.2024.2.6.
10. Mujtaba M. A., Munir M. A., Akhtar M., et al. Leveraging Machine Learning to Optimize Cooling Tower Efficiency for Sustainable Power Generation // Frontiers in Energy Research. 2025. Vol. 13. DOI: 10.3389/fenrg.2025.1473946.
11. Wenzel P. M., Fensterle E., Radgen P. Catalyzing Cooling Tower Efficiency: A Novel Energy Performance Indicator and Functional Unit including Climate and Cooling Demand Normalization // Sustainability. 2023. Vol. 15. No. 21. DOI: 10.3390/su152115454.

12. Белянкин Р. В., Устинов Е. В., Хромов К. С. Применение частотного регулирования для предотвращения образования гидратов природного газа при его охлаждении // Газовая промышленность. 2011. № 2(656). С. 79–83.
13. Антонов В. А., Котляров Е. Ю., Финченко В. С. Экспресс-методика определения эффективной тепловой проводимости компактного газожидкостного теплообменника, функционирующего в атмосферной среде // Тепловые процессы в технике. 2023. Т. 15. № 5. С. 203–214. DOI: 10.34759/tpt-2023-15-5-203-214.
14. Портянихин В. А. Модифицированный метод эффективности-NTU (m-ε-NTU) для расчёта воздухоохлаждателей в режиме с влаговыведением или инеевыпадением. Часть I // Холодильная техника. 2021. Т. 110. № 1. С. 5–11. DOI: 10.17816/RF108665.
15. Михеев М. А., Михеева И. М. Основы теплопередачи. 3-е изд., репр. М.: Изд. дом «Бастет», 2010. 344 с.
16. Navarro H. A., Cabezas-Gómez L. C. Effectiveness-NTU Computation with a Mathematical Model for Cross-Flow Heat Exchangers // Brazilian Journal of Chemical Engineering. 2007. Vol. 24. No. 4. P. 509–518.
17. Методика оценки технического состояния аппаратов воздушного охлаждения газа. ООО «Газпром трансгаз Уфа». Утверждена по протоколу № 145 производственного совещания от 13 декабря 2008 г. Уфа, 2008. 25 с.
18. Roijers D. M., Vamplew P., Whiteson S., et al. A Survey of Multi-Objective Sequential Decision-Making // Journal of Artificial Intelligence Research. 2013. Vol. 48. DOI: 10.1613/jair.3987.
19. Зыкина А. В. Последовательная оптимизация для многокритериальной задачи // Экономика и математические методы. 2006. Т. 42. № 1. С. 110–119.
20. Свитачева М. П. О некоторых многокритериальных методах выбора плановых решений // Социально-экономический и гуманитарный журнал. 2016. № 3(3). С. 32–38.
21. Подиновский В. В., Ногин В. Д. Парето-оптимальные решения многокритериальных задач. М.: Наука, 1982. 258 с.

#### Авторы публикации

**Масков Линар Рамильевич** – ООО «Газпром добыча Ямбург».

**Сафин Альфред Робертович** – д-р техн. наук, доцент по кафедре электроснабжения промышленных предприятий, Казанский государственный энергетический университет.

#### References

1. Abakumov AM, Kuznetsov PK. Kombinirovannoe upravlenie elektroprivodami ventilyatorov ustanovok okhlazhdeniya gaza. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskie nauki*. 2021;29(3):67–82. (In Russ). doi:10.14498/tech.2021.3.4.
2. Novozhilov IM, Abramkin SE, Maltsev PA, et al. Razrabotka sistemy upravleniya apparatom vozdušnogo okhlazhdeniya masla v sostave gazoperekachivayushchego agregata. *Izvestiya SPbGETU LETI*. 2023;16(2):31–43. (In Russ). doi:10.32603/2071-8985-2023-16-2-31-43.
3. Srok sluzhby elektrodvigatelya: analiz ekspluatatsionnykh faktorov i prognozirovaniye dolgovrechnosti. Available at: <https://inner.su/articles/srok-sluzhby-elektrodvigatelya-v-raznykh-usloviyakh-ekspluatatsii.html>. Accessed: 29 Oct 2025. (In Russ).
4. Chen X, Guan L, Yang C, et al. A Novel Optimal Control Method for Building Cooling Water Systems with Variable Speed Condenser Pumps and Cooling Tower Fans. *Buildings*. 2025;15(19). doi:10.3390/buildings15193568.
5. Chang Q, Huang Y, Liu K, et al. Optimization Control Strategies and Evaluation Metrics of Cooling Systems in Data Centers: A Review. *Sustainability*. 2024;16(16).
6. Luo Z, Yao Q. Multi-Model-Based Predictive Control for Divisional Regulation in the Direct Air-Cooling Condenser. *Energies*. 2022;15(13). doi:10.3390/en15134803.
7. Shalygin AV, Fetisov VG, Karyakina IV. Issledovanie raboty apparata vozdušnogo okhlazhdeniya v sisteme magistral'nogo gazoprovoda. *Transport i khraneniye nefteproduktov i uglevodородного syr'ya*. 2023;(2):29–32. (In Russ). doi:10.24412/0131-4270-2023-2-29-32.
8. Zakharov PA, Kryukov OV. Printsipy invariantnogo upravleniya elektroprivodami gazotransportnykh sistem pri sluchaynykh vozmushcheniyakh. *Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta*. 2008;(2):98–103. (In Russ).

9. Zubkov YuV, Abakumov AM, Abakumov OA. Optimizatsiya algoritmov kombinirovannogo upravleniya elektroprivodami ustanovok okhlazhdeniya prirodnogo gaza. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskie nauki*. 2024;32(2):103–118. (In Russ). doi:10.14498/tech.2024.2.6.

10. Mujtaba MA, Munir MA, Akhtar M, et al. Leveraging Machine Learning to Optimize Cooling Tower Efficiency for Sustainable Power Generation. *Frontiers in Energy Research*. 2025;13. doi:10.3389/fenrg.2025.1473946.

11. Wenzel PM, Fensterle E, Radgen P. Catalyzing Cooling Tower Efficiency: A Novel Energy Performance Indicator and Functional Unit including Climate and Cooling Demand Normalization. *Sustainability*. 2023;15(21). doi:10.3390/su152115454.

12. Belyankin RV, Ustinov EV, Khromov KS. Primenenie chastotnogo regulirovaniya dlya predotvrashcheniya obrazovaniya gidratov prirodnogo gaza pri ego okhlazhdenii. *Gazovaya promyshlennost'*. 2011;2(656):79–83. (In Russ).

13. Antonov VA, Kotlyarov EYu, Finchenko VS. Ekspress-metodika opredeleniya effektivnoy teplovoy provodimosti kompaktnogo gazozhidkostnogo teploobmennika, funktsioniruyushchego v atmosfernoй srede. *Teplovye protsessy v tekhnike*. 2023;15(5):203–214. (In Russ). doi:10.34759/tpt-2023-15-5-203-214.

14. Portyanikhin VA. Modifitsirovannyi metod effektivnost'-NTU (m-ε-NTU) dlya rascheta vozdukh-okhladiteley v rezhime s vlagovypadeniem ili ineevypadeniem. *Kholodil'naya tekhnika*. 2021;110(1):5–11. (In Russ). doi:10.17816/RF108665.

15. Mikheev MA, Mikheeva IM. Osnovy teploperedachi. 3rd ed. Moscow: Bastet; 2010. (In Russ).

16. Navarro HA, Cabezas-Gómez LC. Effectiveness–NTU Computation with a Mathematical Model for Cross-Flow Heat Exchangers. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*. 2007;24(4):509–518.

17. Metodika otsenki tekhnicheskogo sostoyaniya apparatov vozdušnogo okhlazhdeniya gaza. Ufa: Gazprom transgaz Ufa; 2008. (In Russ).

18. Roijers DM, Vamplew P, Whiteson S, et al. A Survey of Multi-Objective Sequential Decision-Making. *Journal of Artificial Intelligence Research*. 2013;48. doi:10.1613/jair.3987.

19. Zykina AV. Posledovatel'naya optimizatsiya dlya mnogokriterial'noy zadachi. *Ekonomika i matematicheskie metody*. 2006;42(1):110–119. (In Russ).

20. Svitacheva MP. O nekotorykh mnogokriterial'nykh metodakh vybora planovykh resheniy. *Sotsial'no-ekonomicheskii i gumanitarnyy zhurnal*. 2016;3(3):32–38. (In Russ).

21. Podinovskiy VV, Nogin VD. Pareto-optimal'nye resheniya mnogokriterial'nykh zadach. Moscow: Nauka; 1982. (In Russ).

#### Authors of the publication

**Linar R. Maskov** – Gazprom Dobycha Yamburg LLC, Novy Urengoy, Russia.

**Alfred R. Safin** – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

*Шифр научной специальности: 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы*

**Получено** 01.12.2025 г.

**Отредактировано** 28.01.2026 г.

**Принято** 13.02.2026 г.