

УДК 62-97

Ирек Марселевич Сабиров

ООО «Металл Профиль Поволжье», главный инженер, Россия, Казань, e-mail: SabirovIM1981@yandex.ru

Юлия Николаевна Звонарева

ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет», кандидат технических наук, доцент кафедры промышленной теплоэнергетики и систем теплоснабжения, Россия, Казань, e-mail: skulinaun@mail.ru

Повышение эффективности блочно-модульных котельных на основе математического моделирования и системного анализа

Авторское резюме

Состояние вопроса. В блочно-модульных котельных 3–20 МВт удельное электропотребление на собственные нужды достигает 5,5–8,0 % от выработанной теплоты, что в 1,5–2 раза выше европейских аналогов из-за дроссельного регулирования насосов и тягодутьевых машин. Потенциал экономии электроэнергии по стране превышает 2 млрд кВт·ч/год и напрямую снижает себестоимость тепловой энергии. Цель исследования – разработка и экспериментальная проверка комплекса мер, направленных на снижение электропотребления собственных нужд блочно-модульных котельных 7,5 МВт не менее чем на 30 % за счет внедрения частотно-регулируемого привода и оптимизированных алгоритмов управления.

Материалы и методы. Исследование проведено с применением методов математического моделирования теплогидравлических и аэродинамических режимов, теории регулируемого электропривода насосно-вентиляторных нагрузок, методов оптимизации энергопотребления собственных нужд тепловых установок, а также теории автоматического управления с поддержанием постоянного перепада давления ($\Delta P = \text{const}$) и коэффициента избытка воздуха (λ -регулирование). В качестве инструментов моделирования применены программный комплекс ZuluThermo 10.3 (для теплогидравлических расчетов), среда MATLAB/Simulink (моделирование электропривода и системы собственных нужд), оригинальное программное обеспечение на языке Structured Text (IEC 61131-3) для отладки и внедрения алгоритмов в контроллер котельной.

Результаты. Разработаны мероприятия для типовых российских блочно-модульных котельных, а также алгоритмы управления насосно-вентиляторным оборудованием. Проведены расчетная оценка, компьютерное моделирование и натурные испытания, подтверждающие эффективность разработанных алгоритмов. Показано, что предлагаемые решения позволят снизить потребление электроэнергии на собственные нужды на 28–34 % и повысить общий КПД котельной на 4,7–6,2 %. Достигнуто снижение электропотребления на 34,8 %, рост КПД котельной на 5,4 %, годовая экономия 680 тыс. кВт·ч, окупаемость 2,22 года.

Выводы. Предложенные технические решения могут быть внедрены на большинстве существующих блочно-модульных котельных мощностью 3–20 МВт, поскольку конструктивные особенности оборудования и схемы автоматизации типизированы и унифицированы. Предложенный алгоритм обеспечивает устойчивое снижение электропотребления в широком диапазоне тепловых нагрузок, что подтверждено результатами натурных испытаний. Разработанный комплекс мероприятий является эффективным, экономически оправданным и технологически реализуемым для условий автономных блочно-модульных котельных

Ключевые слова: блочно-модульная котельная, удельное электропотребление на собственные нужды, частотно-регулируемый привод, λ -регулирование, энергоэффективность, оптимизация электропотребления

Irek Marselevich Sabirov

Metal Profile Povolzhye LLC, Chief Engineer, Russia, Kazan, e-mail: SabirovIM1981@yandex.ru

Julia Nikolaevna Zvonareva

Kazan State Power Engineering University (KGEU), Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Associate Professor of Industrial Thermal Power Engineering and Heat Supply Systems Department, Russia, Kazan, e-mail: skulinaun@mail.ru

Improving the efficiency of modular boiler houses based on mathematical modeling and system analysis

Abstract

Background. For modular boiler houses (BMK) of 3–20 MW, the specific power consumption for their own needs reaches 5,5–8,0 % of the generated heat, which is 1,5–2 times higher than its European counterparts due to throttle control of pumps and traction machines. The potential for saving electricity in the country exceeds 2 billion kWh/year and directly reduces the cost of thermal energy. The purpose of the study is to develop and experimentally verify a set of measures to

reduce the power consumption of BMK 7,5 MW's own needs by at least 30 % due to introduction of a variable frequency drive and optimized control algorithms.

Materials and methods. Methods of mathematical modeling of thermohydraulic and aerodynamic modes, the theory of controlled electric drive of pumping and fan loads, methods of optimizing energy consumption for own needs of thermal installations, as well as the theory of automatic control with constant pressure drop ($\Delta P = \text{const}$) and excess air coefficient (λ -regulation) have been applied. The modeling tools used are the ZuluThermo 10.3 software package (for thermohydraulic calculations), the MATLAB/Simulink environment (modeling an electric drive and a system for its own needs), and original software in Structured Text (IEC 61131-3) for debugging and implementing algorithms into the control panel.

Results. The authors have developed a set of measures for typical Russian block-modular boiler houses, as well as control algorithms for pump and fan equipment. A derived estimate, computer modeling and field tests have been carried out to confirm the effectiveness of the developed algorithms. It has been shown that the proposed solutions will reduce electricity consumption for own needs by 28–34 % and increase the overall efficiency of the boiler room by 4,7–6,2 %. A 34,8 % reduction in electricity consumption, 5,4 % increase in boiler efficiency, annual savings of 680 thousand kWh, payback period of 2,22 years have been achieved.

Conclusions. The proposed technical solutions can be implemented in most existing block-modular boiler houses with a capacity of 3–20 MW, since the design features of the equipment and automation schemes are standardized and unified. The proposed algorithm ensures a sustainable reduction of energy consumption over a wide range of thermal loads, as confirmed by the results of full-scale tests. The developed set of measures is effective, cost-effective, and technologically feasible for autonomous block-modular boiler houses.

Key words: block-modular boiler house, specific power consumption for own needs, frequency-controlled supply, λ -regulation, energy efficiency, optimization of power consumption

DOI: 10.17588/2072-2672.2026.2.013-021

Введение. Автономные блочно-модульные котельные (БМК) являются прогрессивным элементом современной распределенной системы теплоснабжения в России [1]. Их применение учитывает значительные территории с низкой плотностью застройки, отсутствие магистральных тепловых сетей и необходимость быстрого ввода тепловых мощностей. В связи с ростом стоимости энергоресурсов в последние годы особое внимание уделяется энергоэффективности таких объектов [2].

По данным исследований [3], в стране эксплуатируется более 27 тыс. автономных котельных, из которых около 40 % – блочно-модульные, поставляемые в заводской готовности. Несмотря на высокую автоматизацию, большинство БМК демонстрирует повышенное потребление электроэнергии на собственные нужды – в среднем 5,5–8 % от выработки [4].

Основными причинами низкой энергетической эффективности котельных являются:

- применение нерегулируемых насосных и вентиляторных агрегатов;
- использование дроссельных методов регулирования (например, с помощью шиберов);
- отсутствие систем автоматической оптимизации теплогидравлических режимов;
- наличие некомпенсированных колебаний расхода теплоносителя.

Для количественной оценки потенциала энергосбережения на исследуемом объекте, расположенном в г. Казани, проведены комплекс теплотехнических, электротехнических и эксплуатационных измерений и анализ их результатов.

Методы исследования. Котельная состоит из трех водогрейных котлов Vitomax 200-NS (2,5 МВт каждый). Продолжительность отопительного периода – 214 суток, средняя нагрузка –

3,2–4,8 МВт, максимальная – 7,5 МВт. Регистрация параметров осуществлялась через SCADA с интервалом 10 с.

Для проведения измерений использовались:

- расходомеры ультразвуковые Siemens Sitrans FUS1010 $\pm 0,5$ %;
- манометры цифровые Wika CPG1500 $\pm 0,1$ %;
- анализатор качества электроэнергии Fluke 435 II (мощность, ток, напряжение, $\cos \varphi$);
- газоанализатор Testo 350 (измерение λ и CO_2).

Общий объем выборки за период испытаний составил около 14 млн строк данных. Указанная выборка позволила выполнить статистический анализ нагруженности оборудования.

Выбор мероприятий по модернизации системы теплоснабжения, включающих установку частотно-регулируемых электроприводов (ЧРП) Danfoss FC-102 на электродвигатели насосно-вентиляторного оборудования и внедрение усовершенствованных алгоритмов автоматизированного управления, основан на комплексном технико-экономическом обосновании.

Частотно-регулируемые приводы Danfoss FC-102 были установлены на основные электропотребляющие агрегаты насосно-вентиляторной группы блочно-модульной котельной, а именно:

- сетевые циркуляционные насосы системы отопления;
- питательные насосы котлов;
- дутьевые вентиляторы горелок;
- дымососы котлов.

Сетевые насосы – центробежные, горизонтального исполнения, номинальная подача 120–140 м³/ч, номинальный напор 18–20 м; электродвигатели мощностью 15 кВт.

Питательные насосы – центробежные, обеспечивающие циркуляцию теплоносителя

через котлоагрегаты; номинальная мощность электродвигателей 7,5 кВт.

Дутьевые вентиляторы – радиальные, одностороннего всасывания, предназначенные для подачи воздуха в горелки котлов Vitomax 200-HS; мощность электродвигателей 11 кВт.

Дымососы – радиальные, обеспечивающие удаление продуктов сгорания и поддержание разрежения в топке; мощность электродвигателей 15 кВт.

Важным фактором является оптимальная интеграция приводов Danfoss FC-102 с системами автоматизации котельных, обеспечиваемая наличием стандартных промышленных интерфейсов Modbus и BACnet, что снижает сложность программно-аппаратной реализации и повышает надежность функционирования системы [5].

Оптимизация алгоритмов управления технологическими процессами включает несколько направлений. Поддержание постоянного перепада давления ($\Delta P = \text{const}$) в системе обеспечивает стабильность гидравлического режима, исключает перекачку теплоносителя и повышает равномерность теплоснабжения потребителей. Оптимизация соотношения газ/воздух по сигналу λ -зонда позволяет минимизировать выбросы вредных веществ при одновременном снижении удельного расхода топлива на 3–7 % [6]. Адаптивное регулирование частоты вращения насосов в зависимости от расхода теплоносителя и температуры наружного воздуха обеспечивает оптимальный теплогидравлический баланс системы и дополнительную экономию электроэнергии.

Регулирование частоты вращения сетевых насосов реализовано по алгоритму поддержания постоянного перепада давления $\Delta P = \text{const}$.

Перепад давления измеряется между подающим и обратным трубопроводами системы отопления в наиболее удаленной гидравлической точке. Сигналы давления формируются датчиками с диапазоном измерения 0–1,6 МПа и передаются в контроллер системы автоматизации.

Уставка по перепаду давления выбиралась на основе расчетных гидравлических характеристик системы и уточнялась в ходе наладочных испытаний таким образом, чтобы обеспечивался нормативный расход теплоносителя без избыточного напора [7].

Управление дутьевыми вентиляторами реализовано на основе λ -регулирования с использованием сигнала кислородного датчика (λ -зонда), установленного в дымоходе котла.

Алгоритм обеспечивает поддержание заданного коэффициента избытка воздуха путем изменения частоты вращения дутьевого вентилятора в зависимости от текущей тепловой нагрузки котла и состава дымовых газов.

При этом регулирование давления воздуха на нагнетании вентилятора осуществляется не по абсолютному давлению, а в связке с

сигналом λ -зонда, что позволяет исключить избыточную подачу воздуха при работе котла в частичных режимах [8].

Уставочные значения по перепаду давления и коэффициенту избытка воздуха определялись на основе проектных данных, расчетного моделирования в среде MATLAB/Simulink и уточнялись по результатам натурных испытаний. Критерием выбора уставок являлось минимальное электропотребление при соблюдении требований по тепловой мощности, устойчивости горения и экологическим показателям [9].

Результаты исследования. Выбор мероприятий по модернизации обусловлен результатами предварительного энергоаудита, который выявил значительные потери энергии, связанные с использованием нерегулируемого электропривода и неоптимальных методов управления. Основными проблемами являлись избыточный напор, создаваемый насосами, и его регулирование дросселированием, отсутствие автоматической оптимизации режимов работы вентиляторов. В связи с этим была запланирована установка частотно-регулируемых электроприводов (ЧРП) Danfoss FC-102 на двенадцать электродвигателей насосов и вентиляторов с одновременной разработкой новых алгоритмов автоматического управления. Решение было направлено на переход от количественного регулирования к качественному с поддержанием постоянного перепада давлений ($\Delta P = \text{const}$), оптимизацией соотношения газ/воздух по сигналу λ -зонда и адаптивным снижением частоты вращения насосов в зависимости от температуры наружного воздуха.

Структурная схема алгоритма управления дутьевым вентилятором с λ -регулированием представлена на рис. 1.

Установка ЧРП Danfoss FC-102 на двенадцать электродвигателей насосов и вентиляторов позволяет оптимизировать энергопотребление системы за счет регулирования частоты вращения в соответствии с текущей тепловой нагрузкой. Согласно кубической зависимости мощности от частоты вращения, снижение скорости на 20 % обеспечивает уменьшение энергопотребления приблизительно на 50 %. Изменение показателей значимо для блочно-модульных котельных, работающих преимущественно в частичных режимах, где годовая экономия эксплуатационных расходов может достигать 15–25 % [10]. Дополнительным преимуществом является повышение ресурса оборудования благодаря плавному пуску и останову двигателей, снижению гидравлических ударов и вибрационных нагрузок, что существенно уменьшает износ подшипников, крыльчаток и элементов трубопроводной системы.

Для оценки эффективности внедрения ЧРП был проведен анализ гидравлических характеристик системы до и после модернизации. Основным

изменением стал переход от характеристики, задаваемой насосом, к характеристике, задаваемой потребностью системы (режим $\Delta P = \text{const}$).

Отличительной особенностью выполненной модернизации является разработка и внедрение оригинального алгоритма управления частотно-регулируемыми приводами насосов и дутьевых вентиляторов, основанного на совместном использовании принципов постоянства перепада давления $\Delta P = \text{const}$ и λ -регулирования, адаптированного к переменным режимам работы блочно-модульной котельной.

Структурная схема алгоритма регулирования сетевого насоса $\Delta P = \text{const}$ представлена на рис. 2.

На основе полученных данных построен график (рис. 3), наглядно демонстрирующий значительное снижение требуемого напора во всем диапазоне расходов.

Снижение напора позволило уменьшить частоту вращения насосных агрегатов на 32–38 %. Согласно кубической зависимости мощности электропривода от частоты вращения, снижение потребляемой мощности составило 51–63 %.

Зависимость мощности от частоты вращения представлена в табл. 1.

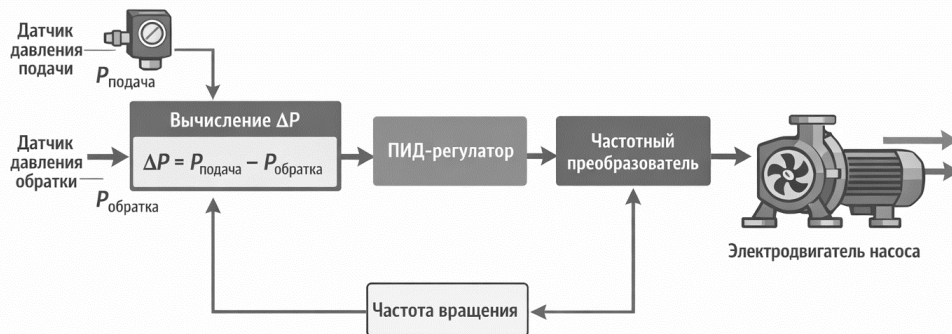


Рис. 1. Структурная схема алгоритма регулирования сетевого насоса $\Delta P = \text{const}$



Рис. 2. Структурная схема алгоритма управления дутьевым вентилятором с λ -регулированием

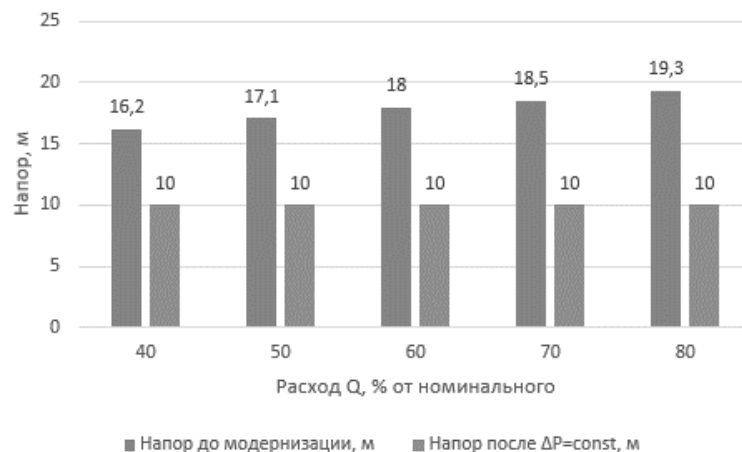


Рис. 3. Гидравлическая характеристика системы отопления (характеристика потребителя) до и после внедрения регулирования $\Delta P = \text{const}$

Таблица 1. Зависимость мощности насоса от частоты вращения

Частота, Гц	Мощность, кВт
50	13,8
45	10,1
40	7,6
35	5,4
30	3,9

Следует отметить, что на рис. 3 представлена гидравлическая характеристика системы отопления (характеристика сети), отражающая зависимость требуемого напора от расхода теплоносителя. Рост напора с увеличением расхода обусловлен квадратичной зависимостью гидравлических потерь в трубопроводах и является характерным для систем теплоснабжения. Внедрение алгоритма регулирования по перепаду давления $\Delta P = \text{const}$ приводит к формированию практически горизонтальной характеристики системы, что свидетельствует об устранении избыточного напора и переходе от регулирования по насосной характеристике к регулированию по потребности системы.

Для верификации полученных результатов проведено моделирование электрической нагрузки системы. Результаты моделирования показали устойчивое снижение токовой нагрузки на электродвигатели всех четырех сетевых насосов, что впоследствии было подтверждено натурными измерениями с помощью анализатора качества электроэнергии Fluke 435 II. Суточный профиль электропотребления до и после модернизации демонстрирует значительное снижение мощности в каждой временной точке. Полученные данные представлены на графике профиля электропотребления (рис. 4).

После модернизации наблюдается устойчивое снижение мощности во всех временных точках измерения. Потребление электроэнергии сократилось в среднем на 27–28 кВт в каждый измеряемый час, что соответствует снижению на 35–40 % от исходного уровня.

Особенно значимым является снижение мощности в периоды максимальной нагрузки:

– в утренний пик (9:00) – снижение на 26 кВт (34,7 %);

– в вечерний пик (18:00) – снижение на 27 кВт (35,5 %).

Относительное постоянство значений мощности после модернизации (колебания в диапазоне 42–49 кВт против 66–76 кВт до модернизации) свидетельствует о стабилизации работы системы и эффективности внедренных алгоритмов управления. Снижение энергопотребления равномерно в течение всех суток, включая ночные часы с минимальной нагрузкой, что подтверждает эффективность решения при различных режимах эксплуатации.

Таким образом, проведенная модернизация позволила достичь значительного и стабильного снижения энергопотребления системы при сохранении ее функциональности во всех режимах работы.

Расчетная оценка экономии электроэнергии от применения частотно-регулируемого привода выполнена на основе законов подобия для насосно-вентиляторных агрегатов. В результате этой оценки устанавливается зависимость потребляемой мощности от частоты вращения рабочего колеса. Для насосов и вентиляторов справедливо соотношение

$$Q \sim n, H \sim n^2, P \sim n^3, \quad (1)$$

где Q – подача; H – напор (давление); P – потребляемая мощность; n – частота вращения.

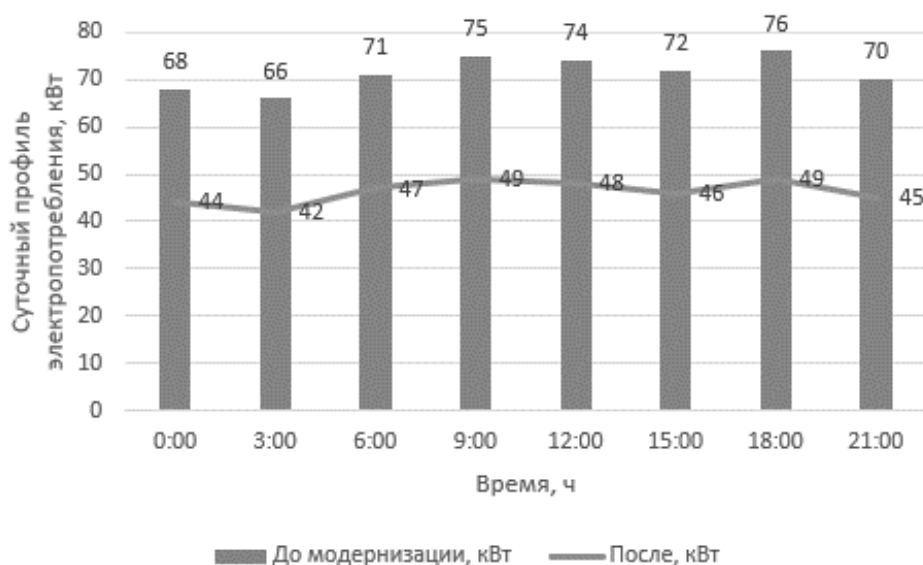


Рис. 4. Суточный профиль электропотребления

Приведем пример расчета для сетевого насоса (номинальная частота вращения $n_0 = 50$ Гц; потребляемая мощность при номинале $P_0 = 13,8$ кВт; рабочая частота при регулировании по $\Delta P = \text{const}$ $n_1 = 35$ Гц) (табл. 2).

Расчет относительной мощности:

$$P_1/P_0 = (n_1 / n_0)^3; \quad (2)$$

$$P_1/13,8 = (35/50)^3 = 0,343;$$

$$P_1 = 4,7 \text{ кВт.}$$

Абсолютная и относительная экономия рассчитана следующим образом:

$$\Delta P = P_0 - P_1 = 13,8 - 4,7 = 9,1 \text{ кВт};$$

$$\eta = \Delta P / P_0 \cdot 100 \% = 9,1 / 13,8 \cdot 100 \% = 66 \%.$$

Таким образом, снижение частоты вращения сетевого насоса с 50 до 35 Гц за счет регулирования по перепаду давления $\Delta P = \text{const}$ обеспечивает снижение потребляемой мощности приблизительно на 66 %, что соответствует теоретической кубической зависимости мощности от частоты вращения и подтверждает высокий потенциал энергосбережения при работе в частичных режимах. Сравнение фактической и расчетной экономии по месяцам приведено в табл. 3 (рис. 5).

Таблица 2. Полная таблица распределения потребления энергии

Потребитель	До модернизации, тыс. кВт·ч	После модернизации	Экономия
Сетевые насосы	298,4	178,6	40,20 %
Дымососы	112,7	79,3	29,60 %
Дутьевые вентиляторы	98,5	64,1	34,90 %
Питательные насосы	46,3	32,8	29,20 %
Итого	583,1	367,4	37,00 %

Таблица 3. Сравнение фактической и расчетной экономии по месяцам

Месяц	Расчетная экономия, %	Фактическая, %
Январь	34,1	33,8
Февраль	35	35,2
Март	34,6	35,4

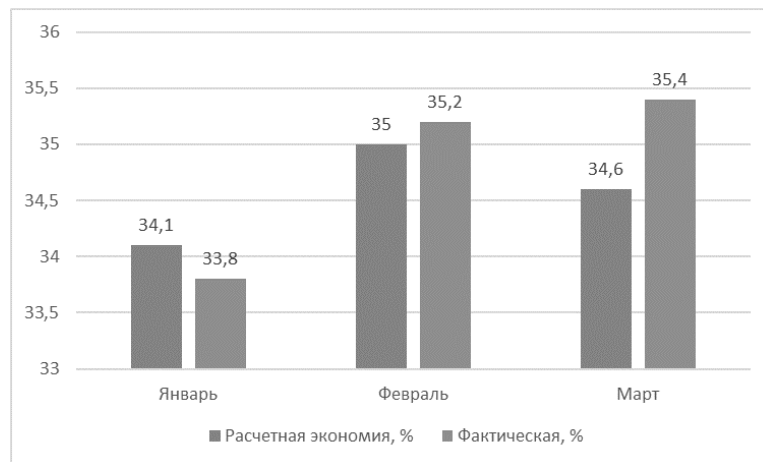


Рис. 5. Сравнение фактической и расчетной экономии

Приведем пример расчета для дутьевого вентилятора (номинальная мощность вентилятора $P_0 = 11$ кВт; номинальная частота: $n_0 = 50$ Гц; средняя рабочая частота при λ -регулировании $n_1 = 40$ Гц):

$$P_1 / P_0 = (40 / 50)^3 = 0,512;$$

$$P_1 = 11 \cdot 0,512 = 5,6 \text{ кВт.}$$

Экономия мощности составляет:

$$\Delta P = 11 - 5,6 = 5,4 \text{ кВт};$$

$$\eta = 5,4 / 11 \cdot 100 \% = 49 \%.$$

Полученное снижение потребляемой мощности дутьевого вентилятора достигается за счет

исключения избыточной подачи воздуха при частичных нагрузках котла. Использование λ -регулирования позволяет автоматически адаптировать частоту вращения вентилятора к реальным условиям горения, обеспечивает дополнительную экономию электроэнергии по сравнению с традиционным регулированием шиберами.

Если вентилятор работает в среднем 4000 ч/год, то годовое потребление электроэнергии составит

$$E = \Delta P \cdot t = 5,4 \cdot 4000 = 21,6 \text{ тыс. кВт·ч/год.}$$

Приведенные расчеты подтверждают, что полученные в ходе натуральных испытаний

значения экономии электроэнергии находятся в хорошем соответствии с расчетной оценкой, основанной на законах подобия для насосно-вентиляторных нагрузок.

Обобщенные данные по потреблению электроэнергии основными группами оборудования за отчетный период представлены в табл. 2. Анализ данных позволяет сделать вывод о равномерно высокой эффективности проведенной модернизации для всех типов регулируемого оборудования.

Полученные результаты (табл. 2) подтверждают высокую эффективность проведенной модернизации. Суммарное энергопотребление снизилось на 37 %, в абсолютном выражении составляет 215,7 тыс. кВт·ч. Наибольший вклад в экономию внесла модернизация сетевых насосов, где достигнуто снижение потребления на 40,2 %, что демонстрирует максимальный потенциал энергосбережения этой категории оборудования.

Все без исключения группы оборудования показали значительное снижение энергопотребления. Дутьевые вентиляторы стали второй по эффективности категорией с экономией 34,9 %, в то время как дымососы и питательные насосы продемонстрировали схожие результаты – 29,6 и 29,2 % соответственно.

Полученные результаты иллюстрируют универсальность и масштабируемость примененных технических решений в автономной блочно-модульной котельной. Наибольшая эффективность достигнута именно для насосного оборудования, соответствует теоретической кубической зависимости мощности от частоты вращения и подтверждает корректность выбранного подхода к модернизации. Равномерное снижение энергопотребления по всем категориям оборудования свидетельствует о системном характере проведенных мероприятий и их комплексном положительном воздействии на энергетическую эффективность предприятия.

Оценка эффективности проведенных мероприятий выполнена в ходе натурных испытаний, которые проходили в течение отопительного периода с января по март 2025 года. Испытания проводились при среднем расходе теплоносителя 115 м³/ч и температурном графике 95/70 °С.

Фактическая экономия электроэнергии за 90 суток испытаний составила 34,8 %, что демонстрирует совпадение с результатами предварительного моделирования (данные для сравнения представлены в табл. 3). Незначительные отклонения находятся в пределах погрешности измерений и подтверждают высокую достоверность проведенных расчетов и корректность выбранных методов модернизации.

Выводы. Предложенный комплекс мероприятий представляет собой технически и экономически обоснованное решение для повышения

эффективности работы автономной блочно-модульной котельной в условиях переменных тепловых нагрузок.

Проведенное исследование направлено на повышение энергоэффективности автономной блочно-модульной котельной путем внедрения частотно-регулируемых электроприводов и оптимизации алгоритмов автоматизированного управления технологическими процессами. Полученные результаты подтверждают высокую эффективность предложенных решений и их практическую применимость для широкого спектра аналогичных объектов теплогенерации.

Анализ состояния вопроса и длительный мониторинг работы существующей БМК подтвердили наличие системной проблемы: удельное потребление электроэнергии на собственные нужды существенно превышает международные ориентиры и рекомендуется его снижение в рамках действующих нормативов по энергоэффективности. Фактические значения 5,5–8 % от выработанной тепловой энергии характеризуют недостаточный уровень технологического оснащения и отсутствие адаптивного регулирования насосно-вентиляторного оборудования.

Проведенные расчеты, моделирование в программных средах и натурные испытания показали, что установка частотно-регулируемых электроприводов на основные электропотребляющие агрегаты обеспечивает снижение фактической потребляемой мощности в среднем на 28–40 % в зависимости от режима работы.

Поддержание постоянного перепада давления $\Delta P = \text{const}$ позволило стабилизировать гидравлический режим и устранить явление перекачки теплоносителя, что является одной из основных причин энергетических потерь в традиционных схемах управления насосами. Использование λ -регулирования обеспечило снижение расхода газа и повышение стабильности процесса горения, что полностью соответствует современным требованиям к экологической безопасности теплогенерирующих объектов.

Проведенный анализ показал, что экономический эффект от внедрения предложенной модернизации является значительным и устойчивым. Предложенные меры не только повышают энергоэффективность, но и способствуют повышению надежности оборудования. Плавные пуски, устранение гидравлических ударов и снижение механических нагрузок приводят к увеличению ресурса насосов и вентиляторов, снижению аварийности и уменьшению затрат на ремонтно-эксплуатационные мероприятия, что является актуальным для автономных БМК, работающих в круглогодичном цикле без возможности длительных остановов.

Результаты исследования обладают высокой степенью практической значимости. Предложенные технические решения могут быть внедрены на большинстве существующих БМК

мощностью 3–20 МВт, поскольку конструктивные особенности оборудования и схемы автоматизации типизированы и унифицированы.

Новизна исследования заключается в комплексной интеграции трех ключевых элементов:

1) частотно-регулируемого привода Danfoss FC-102;

2) адаптивного алгоритма регулирования по перепаду давления $\Delta P = \text{const}$;

3) оптимизации соотношения газ/воздух на основе λ -зонда.

В отличие от типовых решений, применяемых в практике эксплуатации БМК, предложенный алгоритм обеспечивает устойчивое снижение электропотребления в широком диапазоне тепловых нагрузок, что подтверждено результатами натурных испытаний.

Таким образом, проведенное исследование показало, что разработанный комплекс мероприятий является эффективным, экономически оправданным и технологически реализуемым для условий автономных блочно-модульных котельных.

Список литературы

1. **Борискин А.С., Анисимов Н.И., Пучков А.В.** Архитектурные решения при проектировании блочно-модульной котельной // Актуальные вопросы архитектуры и строительства: материалы XXII Междунар. науч.-техн. конф., посвященной 105-летию со дня рождения В.А. Карташова. – Саранск, 2024. – С. 257–259.

2. **Чурилов К.Е.** К вопросу о модернизации котельного оборудования // Энергетика и автоматизация в современном обществе: материалы VI Всерос. науч.-практ. конф. обучающихся и преподавателей. – СПб., 2023. – С. 178–182.

3. **Андрейчик А.Е., Клинцева В.Ф.** Преимущества блочно-модульных котельных // Энергосбережение – важнейшее условие инновационного развития АПК: материалы Междунар. науч.-техн. конф., посвященной 65-летию агроэнергетического факультета и 100-летию И.Ф. Кудрявцева, Минск, 21–22 декабря 2022 г. – Минск: БГАТУ, 2022. – С. 99–101.

4. **Борискин А.С., Анисимов Н.И., Пучков А.В.** Инженерное обеспечение при проектировании блочно-модульной котельной // Актуальные вопросы архитектуры и строительства: материалы XXII Междунар. науч.-техн. конф., посвященной 105-летию со дня рождения В.А. Карташова. – Саранск, 2024. – С. 259–265.

5. **Зимаев К.В., Лютова Т.Е.** Модульные котельные установки // Ползуновский альманах. – 2022. – № 2-2. – С. 58–59.

6. **Куйтеметов Н.Г., Старов Д.В.** Модернизация электронной системы управления блочно-модульной газовой котельной // Научная инициатива: проблемы и перспективы внедрения инновационных решений: материалы науч.-практ. конф. – Астрахань, 2024. – С. 77–79.

7. **Маннанов И.Р., Хасанов Р.Г.** Решения при строительстве и эксплуатации блочно-модульной котельной // Наука. Технология. Производство – 2023: материалы Всерос. науч.-техн. конф., посвященной 75-летию ООО «Газпром нефтехим Салават». – Салават, 2023. – С. 437.

8. **Олийчук А.В.** Необходимость и обоснование повышения эффективности работы блочно-модульной котельной // Актуальные вопросы устойчивого развития регионов, отраслей, предприятий: материалы Междунар. науч.-практ. конф. В 2 т. Т. 1. – Тюмень, 2025. – С. 217–220.

9. **Перепечин В.А., Михайленко О.А.** Устройство модульных котельных // Современная техника и технологии: проблемы, состояние и перспективы: материалы XII Всерос. науч.-практ. конф. с международным участием / Рубцовский индустриальный институт (филиал) ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова». – Рубцовск, 2022. – С. 193–199.

10. **Горгуц А.А., Мартяшова В.А., Аллабердин А.Б.** Эффективность применения блочно-модульных котельных // Водоснабжение, водоотведение и системы защиты окружающей среды: статьи и тезисы. – Уфа, 2021. – С. 135–136.

References

1. Borisikin, A.S., Anisimov, N.I., Puchkov, A.V. *Arkhitekturnye resheniya pri proektirovanii blochno-modul'noy kotel'noy* [Architectural solutions for the design of a block-modular boiler house]. *Materialy XXII Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Aktual'nye voprosy arkhitektury i stroitel'stva», posvyashchennoy 105-letiyu so dnya rozhdeniya V.A. Kartashova* [Proceedings of the Twenty-Second International Scientific and Technical Conference “Topical Issues of Architecture and Construction”, Dedicated to the 105th Anniversary of the Birth of V.A. Kartashov]. Saransk, 2024, pp. 257–259.

2. Churilov, K.E. *K voprosu o modernizatsii kotel'nogo oborudovaniya* [On the issue of modernization of boiler equipment]. *Materialy VI Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii obuchayushchikhsya i prepodavateley «Energetika i avtomatizatsiya v sovremennom obshchestve»* [Materials of the VI All-Russian Scientific and Practical Conference of Students and Teachers “Energy and Automation in Modern Society”]. Saint-Petersburg, 2023, pp. 178–182.

3. Andreychik, A.E., Klintsova, V.F. *Preimushchestva blochno-modul'nykh kotel'nykh* [Advantages of block-modular boiler houses]. *Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Energoberezhnie – vazhneyshee uslovie innovatsionnogo razvitiya APK», posvyashchennoy 65-letiyu agroenergeticheskogo fakul'teta i 100-letiyu I.F. Kudryavtseva, Minsk, 21–22 dekabrya 2022 g.* [Proceedings of the International Scientific and Technical Conference “Energy Saving – the Most Important Condition for Innovative Development of the Agro-Industrial Complex”, Dedicated to the 65th Anniversary of the Agroenergy Faculty and the 100th Anniversary of I.F. Kudryavtsev, Minsk, December 21–22, 2022]. Minsk: BGATU, 2022, pp. 99–101.

4. Borisikin, A.S., Anisimov, N.I., Puchkov, A.V. *Inzhenernoe obespechenie pri proektirovanii blochno-modul'noy kotel'noy* [Engineering support for the design of a block-modular boiler house]. *Materialy XXII Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Aktual'nye voprosy arkhitektury i stroitel'stva», posvyashchennoy 105-letiyu so dnya rozhdeniya V.A. Kartashova* [Proceedings of the Twenty-Second International Scientific and Technical Conference “Topical Issues of Architecture and Construction”, Dedicated to the 105th Anniversary of the Birth of V.A. Kartashov]. Saransk, 2024, pp. 259–265.

5. Zimaev, K.V., Lyutova, T.E. *Polzunovskiy al'manakh*, 2022, no. 2-2, pp. 58–59.

6. Kuytembetov, N.G., Starov, D.V. Modernizatsiya elektronnoy sistemy upravleniya blochno-modul'noy gazovoy kotel'noy [Modernization of the electronic control system of a block-modular gas boiler house]. *Materialy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Nauchnaya initsiativa: problemy i perspektivy vnedreniya innovatsionnykh resheniy»* [Proceedings of the Scientific and Practical Conference “Scientific Initiative: Problems and Prospects for the Implementation of Innovative Solutions”]. Astrakhan', 2024, pp. 77–79.

7. Mannanov, I.R., Khasanov, R.G. Resheniya pri stroitel'stve i ekspluatatsii blochno-modul'noy kotel'noy [Solutions for the construction and operation of a block-modular boiler house]. *Materialy Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Nauka. Tekhnologiya. Proizvodstvo – 2023», posvyashchennoy 75-letiyu OOO «Gazprom neftekhim Salavat»* [Proceedings of the All-Russian Scientific and Technical Conference “Science. Technology. Production – 2023”, Dedicated to the 75th Anniversary of Gazprom Neftekhim Salavat LLC]. Salavat, 2023, p. 437.

8. Oliychuk, A.V. Neobkhodimost' i obosnovanie povysheniya effektivnosti raboty blochno-modul'noy ko-

tel'noy [The need and justification for increasing the efficiency of a block-modular boiler house]. *Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Aktual'nye voprosy ustoychivogo razvitiya regionov, otrasley, predpriyatiy»*. V 2 t. T. 1 [Proceedings of the International Scientific and Practical Conference “Topical Issues of Sustainable Development of Regions, Industries, Enterprises”]. In 2 vols., vol. 1]. Tyumen', 2025, pp. 217–220.

9. Perepechin, V.A., Mikhaylenko, O.A. Ustroystvo modul'nykh kotel'nykh [Construction of modular boiler houses]. *Materialy XII Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem «Sovremennaya tekhnika i tekhnologii: problemy, sostoyaniye i perspektivy»* [Materials of the XII All-Russian Scientific and Practical Conference with International Participation “Modern Equipment and Technologies: Problems, State and Prospects”]. Rubtsovsk, 2022, pp. 193–199.

10. Gorguts, A.A., Martyashova, V.A., Allaberdin, A.B. Effektivnost' primeneniya blochno-modul'nykh kotel'nykh [Efficiency of using block-modular boiler houses]. *Vodosnabzhenie, vodoootvedenie i sistemy zashchity okruzhayushchey sredy: stat'i i tezisy* [Water Supply, Sewerage and Environmental Protection Systems: Articles and Abstracts]. Ufa, 2021, pp. 135–136.