

СПОСОБЫ СНИЖЕНИЯ ХОЛОДОПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ СИСТЕМ КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ ВОЗДУХА В ГЛУБОКИХ РУДНИКАХ НА ОСНОВЕ КОНЦЕПЦИИ «ОХЛАЖДЕНИЕ ПО ТРЕБОВАНИЮ»

Д.В. Ольховский¹, А.В. Зайцев¹, О.С. Паршаков¹, М.О. Пересторонин¹

¹ Горный институт Уральского отделения РАН, Пермь, Россия, e-mail: demexez@gmail.com

Аннотация: Увеличение глубины ведения горных работ сопровождается повышением температур в горных выработках, что требует применения систем кондиционирования воздуха. Однако их высокие холодопроизводительность и энергопотребление снижают рентабельность проектов. С целью снижения холодопотребления и энергозатрат предложен новый принцип управления – «охлаждение по требованию», заключающийся в подаче охлажденного воздуха в рабочие зоны только во время выполнения определенных технологических операций и в объеме, соответствующем реальным потребностям. Рассмотрены методы оптимизации условий работы воздухоохладителей, включая локальное охлаждение рабочих зон, применение систем «вентиляции по требованию», использование самоходного оборудования с кабинами, оборудованными системами кондиционирования воздуха, а также теплоизоляцию воздухоподающих выработок и трубопроводов. Проведенный на примере медно-никелевого рудника расчет показал, что внедрение предложенного комплекса мер позволяет снизить суммарную требуемую холодопроизводительность с 41,8 МВт до 2,8–3,5 МВт. Дополнительно обоснована целесообразность размещения холодильной машины и градирен на поверхности, что обеспечивает наименьшие капитальные и эксплуатационные затраты за счет использования технологии «Free-cooling». Полученные результаты подтверждают, что комплексное применение предложенных решений значительно повышает энергоэффективность шахтных систем кондиционирования.

Ключевые слова: шахтная система кондиционирования, глубокий рудник, энергоэффективность, охлаждение по требованию, вентиляция по требованию, микроклимат, рабочая зона, компоновочная схема.

Благодарность: Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания (рег. номер НИОКТР: 126012716039-2).

Для цитирования: Ольховский Д. В., Зайцев А. В., Паршаков О. С., Пересторонин М. О. Способы снижения холодопроизводительности систем кондиционирования воздуха в глубоких рудниках на основе концепции «охлаждение по требованию» // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2026. – № 8. – С. 5–17. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_8_0_5.

Reduction of cooling capacity of air conditioning systems in deep mines using the Cooling-On-Demand Concept

D.V. Olkhovsky¹, A.V. Zaitsev¹, O.S. Parashakov¹, M.O. Perestoronin¹

¹ Mining Institute, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Perm, Russia, e-mail: demexez@gmail.com

Abstract: An increase in the depth of mining operations is accompanied with the growth of temperature in mines, which requires installing air conditioning systems. At the same time, the high cooling capacity and energy consumption of these systems impair the project economics. Aimed to reduce the cooling capacity and energy consumption of air conditioning, a new concept is proposed—Cooling-On-Demand: it means that cool air is only fed in operating spaces during certain technological operations and in the actually required quantity. The optimization methods of operating conditions of air coolers are discussed, including local cooling of working areas, ventilation-on-demand, employment of self-propelling machines with cabs equipped with air conditioning systems, as well as heat insulation of air inlet ways and ducts. A case-study of a copper–nickel mine shows that the adoption of the proposed set of measures enables reduction in the overall required cooling capacity from 41.8 MW to 2.8–3.5 MW. Additionally, arrangement of a refrigerating machine and tower coolers on ground surface is justified as it ensures the lowest capital and operating costs owing to utilization of the Free Cooling technology. The obtained results prove that the integrated use of the proposed methods appreciably enhances energy efficiency of mine air conditioning.

Key words: mine air conditioning, deep mine, energy efficiency, Cooling-On-Demand, Ventilation-On-Demand, microclimate, working area, layout diagram.

Acknowledgements: The study was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of state contract, R&D Project No. 126012716039-2.

For citation: Olkhovsky D. V., Zaitsev A. V., Parashakov O. S., Perestoronin M. O. Reduction of cooling capacity of air conditioning systems in deep mines using the Cooling-On-Demand Concept. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2026;(8):5-17. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_8_0_5.

Введение

Для поддержания требуемого уровня добычи полезных ископаемых горные предприятия вынуждены вести работы на все больших глубинах [1] и применять высокопроизводительную технику. Увеличение глубины ведения работ приводит к повышению температуры окружающего породного массива, что вместе с возросшими мощностями оборудования приводит к превышению максимально допустимых температур воздуха в рабочих зонах [2, 3]. Для нормализации температуры воздуха применяют-

ся системы кондиционирования воздуха (СКВ), установка и эксплуатация которых сопровождается существенными финансовыми затратами, которые могут сделать значительную часть проектов нерентабельными [4]. С целью снижения стоимости применения СКВ необходимо снижать их требуемую холодопроизводительность и энергопотребление [5]. Для этого исследовалось оптимальное размещение воздухоохладителей в горных выработках [6, 7], а также эффективность применения систем обмена давлением (P.E.S. — pressure exchange

system) вместо традиционных теплообменников для систем с размещением холодильной машины (ХМ) на поверхности [8, 9]. Существующие работы больше сосредоточены на повышении эффективности за счет более удачной компоновки оборудования или уточнения норм микроклиматических параметров [10], однако практически отсутствуют исследования, которые позволяют дать ответ на вопрос, куда, когда и сколько «холода» нужно подавать с точки зрения аэрологии. Подобные подходы применяются к вопросам доставки свежего воздуха в рабочие зоны [11] и минимизации запыленности [12]. Такого рода концепция может быть расширена и на использование холодильных ресурсов под землей — для этого в настоящей работе вводится и объясняется новый принцип управления — «охлаждение по требованию». Основной идеей данного принципа является подача в рабочие зоны определенного при конкретных типах технологических операций количества «холода» и в то время, когда они выполняются. В комплексе с этим принципом в работе рассматривается внедрение ряда других технических решений, позволяющих снизить требуемую холодопроизводительность и энергопотребление шахтной системы кондиционирования.

Энергоэффективность систем кондиционирования воздуха

Повышение энергоэффективности СКВ должно осуществляться в рамках комплексного рассмотрения как решений по компоновке и размещению холодильного оборудования, так и решений по конкретным периодам времени, когда будет подаваться охлажденный воздух, проблемным участкам рудника, куда будет подаваться охлажденный воздух, и требуемым температурам, до которых этот воздух следует охлаждать.

Решение первого вопроса по компоновке потребовало проанализировать вклад основных элементов СКВ в общее потребление электроэнергии.

Для повышения энергоэффективности применения СКВ необходимо понимать, из чего складывается ее энергопотребление и холодопроизводительность. Энергопотребление СКВ определяется по формуле

$$N_{СКВ} = N_H + N_B(t) + \frac{Q_{ХМ}(t)}{EER_{ХМ}} \quad (1)$$

где N_H — энергопотребление циркуляционных насосов; $N_B(t)$ — энергопотребление вентиляторов градирен, может меняться во времени (t); $Q_{ХМ}$ — требуемая холодопроизводительность холодильной машины, может меняться во времени (t); $EER_{ХМ}$ — коэффициент энергоэффективности холодильной машины.

Энергопотребление насосов и вентиляторов не рассматривается в данной работе, поскольку оно в значительной степени определяется конструктивными особенностями конкретного оборудования и не является предметом настоящего исследования. Коэффициент энергоэффективности ($EER_{ХМ}$) зависит от технического совершенства ХМ, а также температуры, до которой возможно охладить хладагент в конденсаторе. Поэтому наиболее целесообразно размещать конденсатор (или градирню) ХМ в местах с наименьшей температурой воздуха.

Учитывая, что в рудниках, где требуется искусственное охлаждение, температура воздуха обычно превышает 26 °С, наиболее рациональным становится размещение ХМ на дневной поверхности, что также решает проблему с запылением градирен.

Наиболее значимым для энергопотребления СКВ является величина требуемой холодопроизводительности ХМ ($Q_{ХМ}$). Она определяется по формуле

$$Q_{XM} = Q_{mp} + Q_n + \sum Q_{BO} \quad (2)$$

где Q_{mp} — тепловыделение от сил трения воды о стенки трубопровода холодного контура и рабочего колеса насоса; Q_n — тепловые потери через трубопроводы холодного контура; Q_{BO} — суммарная требуемая холодопроизводительность воздухоохладителей, она является функцией от множества величин:

$$Q_{BO} = \sum f(L_B, T1_{BO}, w_B, P_B, T2_{BO}, t_{BO}) \quad (3)$$

где L_B — расход воздуха; $T1_{BO}$ — температура воздуха перед воздухоохладителем; w_B — влажность воздуха перед воздухоохладителем; P_B — давление воздуха; $T2_{BO}$ — температура воздуха после воздухоохладителя; t_{BO} — продолжительность работы воздухоохладителя.

Снижение данных величин, за исключением $T2_{BO}$, позволяет снизить требуемую величину холодопроизводительности воздухоохладителей.

Минимизация значений Q_{BO} , Q_{XM} и $N_{СКВ}$ позволит снизить стоимость строительства и эксплуатации СКВ. Далее на примере медно-никелевого рудника представлены технические решения, ко-

торые позволяют добиться этого. Рассматриваемый рудник имеет глубину ведения работ 1800 м, где температура нетронутого породного массива составляет 45–50 °С.

Оптимизация условий применения воздухоохладителей

Воздухоохладитель является главным элементом СКВ, и снижение его требуемой холодопроизводительности (Q_{BO}) позволяет достичь наибольшего результата. Согласно формуле (3), суммарная холодопроизводительность воздухоохладителя зависит от расхода, температуры до и после воздухоохладителя, влажности и давления воздуха, а также продолжительности его работы. Применяя технические решения, позволяющие влиять на данные параметры, возможно добиться снижения холодопроизводительности СКВ.

Согласно многочисленным исследованиям, обеспечить охлаждение всего объема воздуха (L_B), поступающего в рудник, возможно с применением центральных СКВ, мощность которых исчисляется десятками МВт [13–15], а охлаждение обеспечивается несколькими

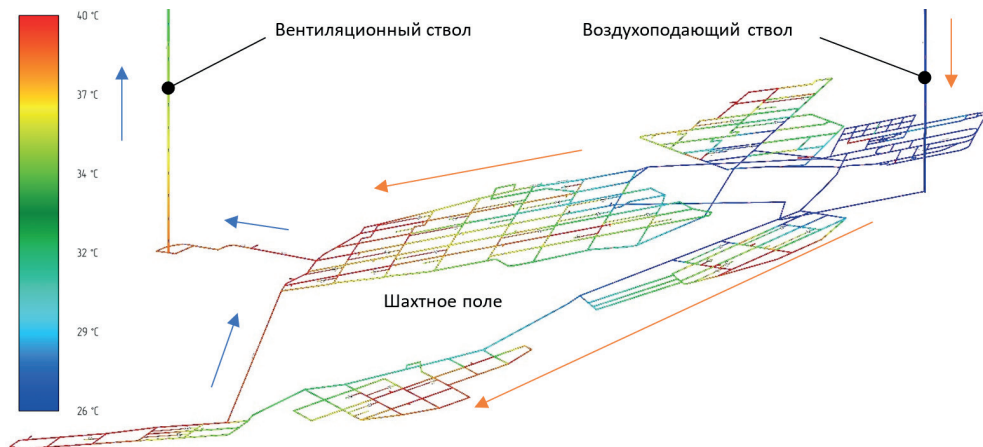


Рис. 1. Расчетное распределение температур воздуха на добычном горизонте рассматриваемого рудника при подаче в ствол воздуха температурой 2 °С

Fig. 1. Calculated distribution of air temperatures at the production level of the mine under consideration when air is supplied to the shaft at a temperature of 2 °С

Таблица 1

Достоинства и недостатки охлаждения всего объема рудничного воздуха и воздуха рабочих зон**Advantages and disadvantages of cooling the entire volume of mine air and the air in working areas**

Охлаждение	Преимущества	Недостатки
Общешахтное	<ul style="list-style-type: none"> • Снижение температуры воздуха в значительном количестве выработок 	<ul style="list-style-type: none"> • Требуются большие мощности СКВ • Температура воздуха в рабочих зонах снижается незначительно
Местное	<ul style="list-style-type: none"> • Позволяет обеспечить требуемую температуру воздуха во всех рабочих зонах • Более низкое холодопотребление относительно систем, охлаждающих весь воздух 	<ul style="list-style-type: none"> • Требуется разветвленная сеть трубопроводов в руднике • Воздух в выработках без рабочих зон не охлаждается и может превышать допустимые температуры

ступенями воздухоохладителей. Это подтверждают и результаты проведенного расчета распределения температуры воздуха в выработках (рис. 1), согласно которому для охлаждения на поверхности воздуха в объеме 1340 м³/с в теплый период года с температуры 21 °С и относительной влажности 61% до 2 °С требуется холодопроизводительность 54,8 МВт. При этом глубины охлаждения воздуха на поверхности хватает только на обеспечение требуемыми температурами выработок околоствольного двора. Причиной этого является гидростатический нагрев воздуха при движении по воздухоподающему стволу [16], величина которого достигает 13,6 °С, а также интенсивный теплообмен с окружающим породным массивом. Для обеспечения требуемых температур в остальной части рудника требуется установка дополнительных ступеней охлаждения в подземной части, что существенно увеличит требуемую холодопроизводительность.

Данный способ позволяет снизить температуру воздуха в большей части выработок, но требует значительных капитальных и эксплуатационных затрат и не может обеспечить все рабочие зоны требуемыми параметрами микроклимата. Альтернативой ему является

местное охлаждение, суммарная мощность которого будет ниже за счет охлаждения только воздуха, поступающего на проветривание рабочих зон.

Всего в рассматриваемом руднике имеется 45 рабочих зон. Для их проветривания по максимальному фактору, учитывая газовыделение от двигателя внутреннего сгорания (ДВС), требуется 658 м³/с. Согласно результатам расчетов, в теплый период года температура воздуха в выработках может подниматься до значений 39 °С с относительной влажностью 80%. Для охлаждения воздуха в рабочих зонах до 26 °С требуется холодопроизводительность 41,8 МВт. Данное значение лишь немного ниже холодопроизводительности центральной СКВ на поверхности, что объясняется существенным ростом влажности воздуха в выработках перед рабочими зонами. Однако данный подход позволяет обеспечить требуемую температуру воздуха во всех рабочих зонах рудника. Сравнение данных вариантов охлаждения приведены в табл. 1.

Для дополнительного снижения требуемой холодопроизводительности в рудниках, где рабочие зоны проветриваются по фактору газовыделений от самодного горно-шахтного оборудования (СГШО) с двигателем внутреннего сго-

рания, возможно реализовать комплекс мер, который позволяет отказаться от охлаждения максимального объема воздуха, подаваемого в рабочую зону во время работы СГШО.

К ним относятся:

- применение СГШО с СКВ кабины машиниста;
- применение принципа «Вентиляция по требованию»;
- применение принципа «Охлаждение по требованию».

Использование СГШО с СКВ кабины позволяет обеспечить машиниста требуемыми параметрами микроклимата и не использовать охлаждение всей выработки во время его работы.

Применение принципа «Вентиляция по требованию» дает возможность менять объем подачи воздуха в рабочую зону в зависимости от типа выполняемых операций. Например, в рассматриваемом руднике при работе СГШО в тупиковой выработке требуется $14,3 \text{ м}^3/\text{с}$, а при всех остальных операциях — только $2,1 \text{ м}^3/\text{с}$. С учетом отсутствия необходимости охлаждения воздуха во время работы СГШО это позволяет снизить установочную мощность воздухоохлаждателей, а также расчетное количество воздуха, подаваемое в рудник. Снижение мощности охлаждения воздухоохлаждателей достигается за счет уменьшения охлаждаемого объема воздуха, а также тепловыделений от вентиляторов местного проветривания (ВМП). Данный принцип может быть реализован за счет применения частотного регулирования электродвигателя ВМП и развитых систем автоматизации и диспетчеризации.

Для обеспечения минимальной мощности центральной СКВ, а следовательно и ее капитальных и эксплуатационных затрат, необходимо реализовать принцип «Охлаждение по требованию», который подразумевает возможность

плавного изменения мощности охлаждения от 0 до максимального значения в зависимости от типа выполняемых операций в рабочей зоне. Реализация данного принципа позволяет снизить время работы воздухоохлаждателей ($t_{\text{во}}$) и использовать охлаждение воздуха только там, где это нужно в данный момент, что приводит к снижению требуемой холодопроизводительности СКВ.

Применение данного комплекса мер в рассматриваемом медно-никелевом руднике позволило снизить количество одновременно охлаждаемых рабочих зон с 45 до 13 единиц, объем охлаждаемого воздуха с 658 до $32,2 \text{ м}^3/\text{с}$, а требуемую суммарную мощность всех воздухоохлаждателей с 41,8 до 3,5 МВт.

Отдельно стоит отметить, что применение электрических СГШО с СКВ кабины позволяет сохранить все преимущества для СКВ и отказаться от применения принципа «Вентиляция по требованию» по причине независимости расхода воздуха, подаваемого в рабочую зону, от типа выполняемых операций и еще больше снизить требуемый расход воздуха, подаваемого в шахту.

Таким образом, охлаждение воздуха только рабочих зон с применением СГШО с СКВ и принципов «Вентиляция и охлаждение по требованию» позволяет на порядок снизить требуемую холодопроизводительность для рудника.

Температура воздуха перед воздухоохлаждателями ($T_{\text{во}}$) зависит от следующих факторов, на которые возможно оказать воздействие:

- температуры воздуха, подаваемого в рудник;
- теплообмена с окружающим породным массивом;
- тепловыделений различного горного оборудования (вентиляторы, компрессоры, СГШО и пр.).

Снижение температуры воздуха, подаваемого в рудник, необходимо обес-

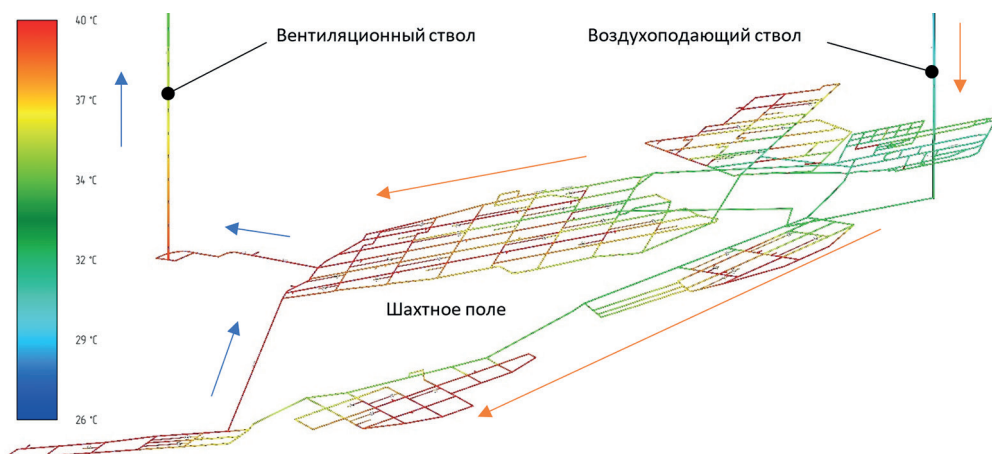


Рис. 2. Расчетное распределение температур воздуха на добычном горизонте рассматриваемого рудника в летний период без охлаждения

Fig. 2. Calculated distribution of air temperatures at the production level of the mine in question in the summer period without cooling

печивать не только за счет работы поверхностной СКВ летом, но и за счет снижения нагрева воздуха на калориферных установках в холодный период года. Как показывает практика, значительное количество горных предприятий в холодный период года поддерживают температуру подачи воздуха в рудник в диапазоне 15–20 °С. Снижение температуры до минимально допустимого значения 2 °С (согласно ФНиП «Правила безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых»), по результатам расчетов, позволяет обеспечить околоствольные выработки допустимой температурой без искусственного охлаждения в зимний период времени (см. рис. 1) и снизить температуру воздуха, доходящего до воздухоохладителей рабочих зон, на 5–16 °С по сравнению с случаем подачи в ствол воздуха с температурой 20 °С (рис. 2). Кроме того, за счет растепления породного массива в холодный период температурные условия в выработках в теплый период становятся более благоприятными.

При обеспечении подачи из ствола на горизонт воздуха с достаточно низкой

температурой следующим вопросом является сохранение «холода» и доведение его до потребителя. Наиболее эффективным способом сделать это является организация проветривания участков через главную воздухоподающую выработку, стенки которой покрыты теплоизоляцией (см. рис. 3).

Организация теплоизоляции на главных воздухоподающих выработках позволяет обеспечить доведение более холодного воздуха до дальних рабочих зон. Однако применение данного способа требует детальной проработки таких аспектов, как выбор теплоизоляционного материала, определение толщины изоляции, способ крепления, обеспечение теплоизоляции почвы выработки. Указанные вопросы представляют собой самостоятельную научно-техническую проблему, выходящую за рамки данной статьи, и потому нуждаются в отдельном детальном исследовании. Отметим лишь то, что данный способ позволил снизить температуру воздуха перед воздухоохладителями в рассматриваемом примере на 5 °С, что позволило дополнительно снизить требуемую холодопроизводительность СКВ с 3,5 до 2,8 МВт.

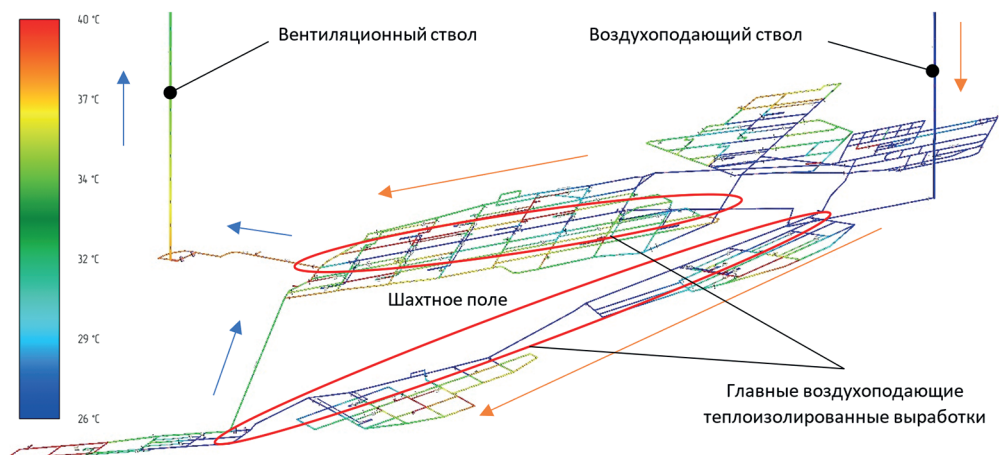


Рис. 3. Расчетные распределения температур воздуха на добычном горизонте рассматриваемого рудника при подаче в рудник воздуха с температурой +2 °С и организации проветривания через главные воздухоподающие теплоизолированные выработки

Fig. 3. Calculated distribution of air temperatures at the production level of the mine under consideration when air with a temperature of +2 °C is supplied to the mine and ventilation is organized through the main air-supplying heat-insulated workings

Для снижения тепловыделений от горного оборудования необходимо уменьшать его мощность или переносить на поверхность. Так, для снижения тепловыделений от ВМП необходимо увеличивать диаметр вентиляционного тру-

бопровода, что позволяет снизить сопротивление сети и, как итог, нагрев воздуха от вентилятора [17]. Известны случаи, когда использование трубопровода малого диаметра (600 мм) приводило к нагреву воздуха от вентилято-

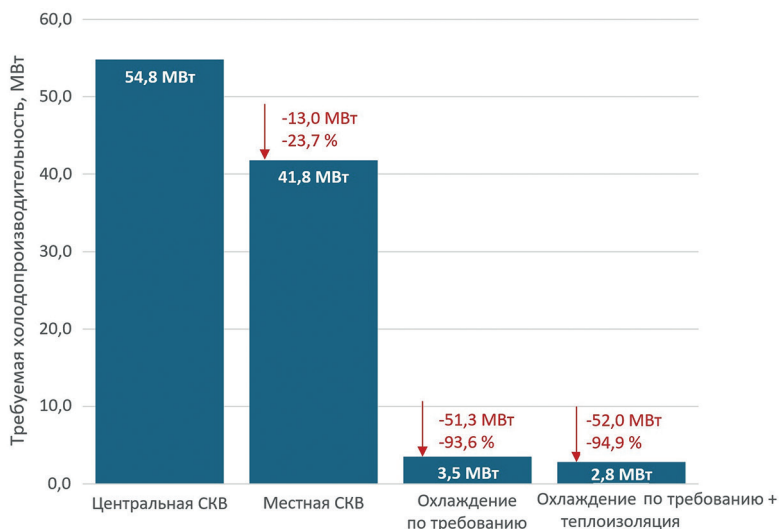


Рис. 4. Снижение требуемой холодопроизводительности системы кондиционирования воздуха при внедрении предложенного комплекса мер

Fig. 4. Reduction of the required cooling capacity of the air conditioning system when implementing the proposed set of measures

ра (FBD No. 8.0/2*55) на 8,9 °С [18]. Снизить тепловыделение возможно и у СГШО за счет их применения с электродвигателями вместо ДВС. Например, ожидаемый уровень тепловыделений от ПДМ Caterpillar R1700 с ДВС ожидается на уровне 250 кВт, в то время как от такой же модели с электродвигателем (Caterpillar R1700 ХЕ) — уже 50 кВт, что объясняется значительно более высоким КПД электродвигателей (0,8–0,98) по сравнению с ДВС (0,2–0,4). В качестве примера выноса оборудования на поверхность могут послужить компрессорные станции, тепловыделение от которых достигает сотен киловатт, что локально может нагревать воздух в выработке более чем на 10 °С. В рассматриваемом руднике увеличение диаметра трубопровода не потребовалось, так как нагрев от вентилятора не превышал 3 °С, а применение остальных мероприятий требовало существенной переработки проекта. В результате предложенный комплекс мер позволил снизить в рассматриваемом примере требуемую холодопроизводительность системы кондиционирования в 19 раз, с 54,8 до 2,8 МВт (см. рис. 4).

Оптимизация применения холодильной машины

Согласно формуле (2), требуемая мощность ХМ помимо требуемой мощности воздухоохладителей складывается из компенсации нагрева от силы трения воды в трубопроводе (Q_{mp}) и тепловых потерь (Q_n). Повлиять на нагрев воды от сил трения затруднительно, однако снизить тепловые потери возможно. Для этого необходимо применение теплоизоляции трубопроводов с хладоносителем. Ее эффективность зависит от протяженности трубопроводов [19], а в некоторых случаях без нее довести хладоноситель до потребителя с требуемой температурой невозможно. Кроме того,

ее применение увеличивает срок службы металлических трубопроводов, так как исключает конденсацию влаги на их поверхности и существенно снижает скорость коррозии [20]. Параметры теплоизоляции определяются исходя из цели ее применения при помощи математического моделирования.

Источником холода для СКВ может быть как центральная ХМ, так и местная, расположенная вблизи рабочих зон. Однако применение центральной ХМ [7, 8] дает более высокий коэффициент энергоэффективности ($EER_{ХМ}$), что, согласно формуле (1), позволяет снизить энергопотребление СКВ. Кроме того, центральная ХМ имеет меньшую стоимость оборудования, чем у группы местных установок. Таким образом, наиболее целесообразно применять центральные ХМ.

Для повышения энергоэффективности и снижения стоимости применения центральной ХМ необходимо также рассмотреть варианты расположения ее и градирен. Всего есть три возможных варианта размещения: ХМ и градирни под землей; ХМ под землей, а градирня на поверхности; ХМ и градирня на поверхности. Преимущества и недостатки данных вариантов приведены в табл. 2.

С целью определения наиболее энергоэффективного варианта был произведен расчет годового энергопотребления СКВ для рассматриваемого медно-никелевого рудника. Согласно ему, при размещении ХМ под землей требуемая холодопроизводительность ($Q_{ХМ}$) составила 3,9 МВт, а в случае размещения на поверхности — 4,3 МВт. Однако годовое энергопотребление в первом случае составило 36,6 ГВт·ч/год, а во втором 12,5 ГВт·ч/год. Данная разница обусловлена применением технологии «Free-cooling», которая охлаждает хладоноситель не за счет работы ХМ, а за счет наружного воздуха в холодный пе-

Таблица 2

Достоинства и недостатки различных компоновок центральной ХМ и градирни
Advantages and disadvantages of different central cooling machine and cooling tower configurations

Размещение оборудования	Достоинства	Недостатки
ХМ и градирня под землей	<ul style="list-style-type: none"> • Более низкая требуемая холодопроизводительность 	<ul style="list-style-type: none"> • Рудничное или взрывозащищенное исполнение оборудования (более дорогое) • Тепловыделения отводятся в рудничную атмосферу • Менее эффективное отведение тепла, что приводит к повышенному потреблению электричества и металлоемкости градирен • Необходимость строительства дополнительных подземных выработок
ХМ под землей, градирня на поверхности	<ul style="list-style-type: none"> • Более низкая требуемая холодопроизводительность • Тепловыделения отводятся напрямую в атмосферу • Более высокий $EER_{ХМ}$ 	<ul style="list-style-type: none"> • Рудничное или взрывозащищенное исполнение оборудования (более дорогое) • При глубинах свыше 1,5 км необходимо использовать промежуточные теплообменники • Необходимость строительства дополнительных подземных выработок
ХМ и градирня на поверхности	<ul style="list-style-type: none"> • Общепромышленное исполнение оборудования • Простота обслуживания • Простота обеспечения требуемыми ресурсами (электричество, вода) • Возможность охлаждения хладоносителя наружным воздухом в холодное время года (технология «Free-cooling») • Тепловыделения отводятся напрямую в атмосферу • Более высокий $EER_{ХМ}$ 	<ul style="list-style-type: none"> • Несколько большая требуемая холодопроизводительность из-за необходимости компенсировать нагрев воды в трубопроводе до горизонтов рудника • При глубинах свыше 1,5 км необходимо использовать промежуточные теплообменники • В случае если не применяется P.E.S., минимальная температура холодной воды, подаваемой на горизонт, имеет более высокие значения

риод года, что позволяет экономить ресурс компрессора ХМ и снижать энергопотребление на охлаждение. Таким образом, можно сделать вывод, что наиболее энергоэффективным и с минимальным капитальными и эксплуатационными затратами будет применение варианта размещения ХМ и градирни на поверхности.

Выводы

Предложен принцип «охлаждение по требованию», согласно которому количество и время подачи «холода» в рабочие зоны рудника зависит от типа тех-

нологических операций. При применении данного принципа в комплексе с рядом других способов улучшения энергоэффективности систем кондиционирования, из которых ключевыми являются использование систем кондиционирования кабин СГШО и принципа «Вентиляция по требованию», удалось снизить в рассматриваемом примере требуемую холодопроизводительность системы кондиционирования в 19 раз (с 54,8 до 2,8 МВт).

В дополнение к предложенному комплексу мер по снижению требуемой холодопроизводительности системы конди-

ционирования был сделан вывод о том, что наилучшим компоновочным решением по размещению основного оборудования является размещение холодильной машины и градирни на поверхности, что позволяет снизить годовое энерго-

потребление системы кондиционирования в климатических зонах с продолжительным периодом отрицательных температур до 3 раз (с 36,6 до 12,5 ГВт·ч/год в рассматриваемом случае) за счет применения технологии «Free-cooling».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kuyuk A. F., Ghoreishi-Madiseh S. A., Hassani F. P. Closed-loop bulk air conditioning: A renewable energy-based system for deep mines in arctic regions // *International Journal of Mining Science and Technology*. 2020, vol. 30, no. 4, pp. 511 – 516. DOI: 10.1016/j.ijmst.2020.05.011.

2. Zhang G., Jiang Z., Wang H., Jing X., Si M., Zeng F., Yang B., Yang X., Feng R. The coupled cooling effect of ventilation and spray in the deep-buried high-temperature tunnel // *Case Studies in Thermal Engineering*. 2023, vol. 45, article 103011. DOI: 10.1016/j.csite.2023.103011.

3. Li X., Chen Z., Huang L., Li B., Yan J., Zhang P., Liu Z. Life cycle dynamic formation temperature response and thermal energy extraction of mine geothermal system considering groundwater flow // *International Journal of Mining Science and Technology*. 2025, vol. 35, no. 1, pp. 1 – 17. DOI: 10.1016/j.ijmst.2024.12.011.

4. Ghoreishi-Madiseh S. A., Sasmito A. P., Hassani F. P., Amiri L. Performance evaluation of large scale rock-pit seasonal thermal energy storage for application in underground mine ventilation // *Applied Energy*. 2017, vol. 185, pp. 1940 – 1947. DOI: 10.1016/j.apenergy.2016.01.062.

5. Wang T., Wei Y., Ou S., Jin L., Wang S., Liu J., Zhang G., Zhou Y., Lin M. Multistage cooling system for temperature reduction of the working face in deep coal mines: A technical-economic evaluation // *Case Studies in Thermal Engineering*. 2023, vol. 45, article 102908. DOI: 10.1016/j.csite.2023.102908.

6. Цейтлин Ю. А. Проектирование и эксплуатация шахтных систем кондиционирования воздуха. – М.: Недра, 1983. – 261 с.

7. Цейтлин Ю. А. Установки для кондиционирования воздуха в шахтах. – М.: Недра, 1974. – 168 с.

8. McPherson M. J. *Subsurface ventilation engineering*. Berkeley, 2007, 834 p.

9. Алабьев В. Р. Основные направления развития способов и средств охлаждения воздуха в угольных шахтах Украины // *Вестник Забайкальского государственного университета*. – 2014. – № 6. – С. 35 – 46.

10. Зайцев А. В., Бородавкин Д. А., Поляков И. В. Обеспечение безопасных условий труда по фактору микроклимата для условий глубокого калийного рудника // *Горное эхо*. – 2020. – № 1. – С. 72 – 79. DOI: 10.7242/echo.2020.1.16.

11. Круглов Ю. В. Теоретические и технологические основы построения систем оптимального управления проветриванием подземных рудников: Автореф. дис. ... докт. техн. наук. – Пермь, 2012. – 42 с.

12. Исаевич А. Г., Шалимов А. В., Александрова М. А. Перспектива снижения запыленности в очистном забое и увеличения коэффициента извлечения в условиях калийного рудника при камерной системе разработки // *Безопасность труда в промышленности*. – 2021. – № 12. – С. 37 – 43. DOI: 10.24000/0409-2961-2021-12-37-43.

13. Kuyuk A. F., Ghoreishi-Madiseh S. A., Sasmito A. P., Hassani F. Designing a large-scale lake cooling system for an ultra-deep mine: A Canadian case study // *Energies*. 2019, vol. 12, no. 5, article 811. DOI: 10.3390/en12050811.

14. Belle B., Biffi M. Cooling pathways for deep Australian longwall coal mines of the future // *International Journal of Mining Science and Technology*. 2018, vol. 28, no. 6, pp. 865 – 875. DOI: 10.1016/j.ijmst.2018.02.001.

15. Cluff D. L., Kennedy G. A., Foster P. J. Liquid air for energy storage, auto-compression, compressed air and ventilation in deep mining / *Deep Mining 2014: Proceedings of the Seventh International Conference on Deep and High Stress Mining*. Australian Centre for Geomechanics, 2014, pp. 757 – 770. DOI: 10.36487/ACG_rep1410_54_Cluff.

16. Семин М. А., Колесов Е. В., Газизуллин Р. Р., Мальцев С. В. Оценка влияния суточных колебаний термодинамических параметров атмосферного воздуха на распределение его темпера-

туры в воздухоподающих стволах калийных рудников // Записки Горного института. — 2026. — № 277. — С. 94–106.

17. Ольховский Д. В. Нормализация микроклиматических параметров тупиковых горных выработок глубоких рудников. Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Пермь: ПФИЦ УрО РАН, 2024. — 21 с.

18. Zaitsev A., Parshakov O., Semin M. Heat emissions from mining machinery: implications for microclimatic conditions in underground workings // *Mining*. 2024, vol. 4, no. 4, pp. 1075–1092. DOI: 10.3390/mining4040059.

19. Zhang G., Jiang Z., Chen J., Chen J., Yang B. Study of the convection heat transfer law and temperature prediction of the duct in high-temperature tunnels // *Case Studies in Thermal Engineering*. 2022, vol. 36, article 102208. DOI: 10.1016/j.csite.2022.102208.

20. Дунаева А. В., Логунова Т. С., Кононова М. С. О целесообразности применения жидкой изоляции в тепловых сетях / *Строительство–2016. Материалы II Брянского международного инновационного форума*. Т. 1. — Воронеж, 2016. — С. 43–47. **ГИАБ**

REFERENCES

1. Kuyuk A. F., Ghoreishi-Madiseh S. A., Hassani F. P. Closed-loop bulk air conditioning: A renewable energy-based system for deep mines in arctic regions. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2020, vol. 30, no. 4, pp. 511–516. DOI: 10.1016/j.ijmst.2020.05.011.

2. Zhang G., Jiang Z., Wang H., Jing X., Si M., Zeng F., Yang B., Yang X., Feng R. The coupled cooling effect of ventilation and spray in the deep-buried high-temperature tunnel. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2023, vol. 45, article 103011. DOI: 10.1016/j.csite.2023.103011.

3. Li X., Chen Z., Huang L., Li B., Yan J., Zhang P., Liu Z. Life cycle dynamic formation temperature response and thermal energy extraction of mine geothermal system considering groundwater flow. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2025, vol. 35, no. 1, pp. 1–17. DOI: 10.1016/j.ijmst.2024.12.011.

4. Ghoreishi-Madiseh S. A., Sasmito A. P., Hassani F. P., Amiri L. Performance evaluation of large scale rock-pit seasonal thermal energy storage for application in underground mine ventilation. *Applied Energy*. 2017, vol. 185, pp. 1940–1947. DOI: 10.1016/j.apenergy.2016.01.062.

5. Wang T., Wei Y., Ou S., Jin L., Wang S., Liu J., Zhang G., Zhou Y., Lin M. Multistage cooling system for temperature reduction of the working face in deep coal mines: A technical-economic evaluation. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2023, vol. 45, article 102908. DOI: 10.1016/j.csite.2023.102908.

6. Tseytlin Yu. A. *Proektirovanie i ekspluatatsiya shakhtnykh sistem konditsionirovaniya vozdukha* [Design and operation of mine air conditioning systems], Moscow, Nedra, 1983, 261 p.

7. Tseytlin Yu. A. *Ustanovki dlya konditsionirovaniya vozdukha v shakhtakh* [Conditioning Units for Mines], Moscow, Nedra, 1974, 168 p.

8. McPherson M. J. *Subsurface ventilation engineering*. Berkeley, 2007, 834 p.

9. Alabiev V. R. Main directions of development of methods and means of air cooling in coal mines of Ukraine. *Transbaikal state university journal*. 2014, no. 6, pp. 35–46.

10. Zaitsev A. V., Borodavkin D. A., Polyakov I. V. Ensuring safe working conditions in terms of microclimate for a deep potash mine. *Gornoye Ekho*. 2020, no. 1, pp. 72–79. [In Russ]. DOI: 10.7242/echo.2020.1.16.

11. Kruglov Yu. V. *Teoreticheskie i tekhnologicheskie osnovy postroeniya sistem optimal'nogo upravleniya provetrivaniem podzemnykh rudnikov* [Theoretical and technological foundations for constructing optimal ventilation control systems for underground mines], Doctor's thesis, Perm, 2012, 42 p.

12. Isaevich A. G., Shalimov A. V., Aleksandrova M. A. Prospects for reducing dust in the production face and increasing the extraction coefficient in a potash mine using a chamber-and-panel mining system. *Occupational Safety in Industry*. 2021, no. 12, pp. 37–43. [In Russ]. DOI: 10.24000/0409-2961-2021-12-37-43.

13. Kuyuk A. F., Ghoreishi-Madiseh S. A., Sasmito A. P., Hassani F. Designing a large-scale lake cooling system for an ultra-deep mine: A Canadian case study. *Energies*. 2019, vol. 12, no. 5, article 811. DOI: 10.3390/en12050811.

14. Belle B., Biffi M. Cooling pathways for deep Australian longwall coal mines of the future. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2018, vol. 28, no. 6, pp. 865–875. DOI: 10.1016/j.ijmst.2018.02.001.

15. Cluff D. L., Kennedy G. A., Foster P. J. Liquid air for energy storage, auto-compression, compressed air and ventilation in deep mining. *Deep Mining 2014: Proceedings of the Seventh International Conference on Deep and High Stress Mining*. Australian Centre for Geomechanics, 2014, pp. 757–770. DOI: 10.36487/ACG_rep/1410_54_Cluff.

16. Semin M. A., Kolesov E. V., Gazizullin R. R., Maltsev S. V. Assessment of the influence of daily fluctuations in the thermodynamic parameters of atmospheric air on the distribution of its temperature in the air supply shafts of potash mines. *Journal of Mining Institute*. 2026, no. 277, pp. 94–106. [In Russ].

17. Ol'khovskiy D. V. *Normalizatsiya mikroklimaticheskikh parametrov tupikovykh gornykh vy-rabotok glubokikh rudnikov* [Normalization of microclimatic parameters in blind headings of deep mines], Candidate's thesis, Perm, 2024, 21 p.

18. Zaitsev A., Parshakov O., Semin M. Heat emissions from mining machinery: implications for microclimatic conditions in underground workings. *Mining*. 2024, vol. 4, no. 4, pp. 1075–1092. DOI: 10.3390/mining4040059.

19. Zhang G., Jiang Z., Chen J., Chen J., Yang B. Study of the convection heat transfer law and temperature prediction of the duct in high-temperature tunnels. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2022, vol. 36, article 102208. DOI: 10.1016/j.csite.2022.102208.

20. Dunaeva A. V., Logunova T. S., Kononova M. S. On the feasibility of using liquid insulation in thermal networks. *Stroitel'stvo–2016. Materialy II Bryanskogo mezhdunarodnogo innovatsionnogo foruma*. T. 1 [Construction–2016. Proceedings of the II Bryansk International Innovation Forum, vol. 1], Voronezh, 2016, pp. 43–47. [In Russ].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Ольховский Дмитрий Владимирович¹ — канд. техн. наук, научный сотрудник,
e-mail: demexez@gmail.com, ORCID ID: 0009-0009-6370-149X,

Зайцев Артем Вячеславович¹ — д-р техн. наук, зав. лабораторией;
профессор, Пермский национальный исследовательский
политехнический университет, e-mail: artem.v.zaitsev@yandex.ru,
ORCID ID: 0000-0002-2314-0482,

Паршаков Олег Сергеевич¹ — канд. техн. наук, научный сотрудник,
e-mail: olegparshakov@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-5545-442X,

Пересторонин Максим Олегович¹ — аспирант, инженер,
e-mail: maksim.o.perestoronin@yandex.ru, ORCID ID: 0009-0003-0203-9304,

¹ Горный институт Уральского отделения РАН,
лаборатория Развития горного производства.

Для контактов: Ольховский Д.В., e-mail: demexez@gmail.com.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

D.V. Olkhovsky¹, Cand. Sci. (Eng.), Researcher,
e-mail: demexez@gmail.com, ORCID ID: 0009-0009-6370-149X,

A.V. Zaitsev¹, Dr. Sci. (Eng.), Head of Laboratory;
Professor, Perm National Research Polytechnic University,
e-mail: artem.v.zaitsev@yandex.ru, ORCID ID: 0000-0002-2314-0482,

O.S. Parashakov¹, Cand. Sci. (Eng.), Researcher,
e-mail: olegparshakov@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-5545-442X,

M.O. Perestoronin¹, Graduate Student, Engineer,
e-mail: maksim.o.perestoronin@yandex.ru, ORCID ID: 0009-0003-0203-9304,

¹ Mining Institute, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
Laboratory for the Development of Mining Industrial Perm, 614007, Russia.

Corresponding author: D.V. Olkhovsky, e-mail: demexez@gmail.com.

Получена редакцией 11.02.2026; получена после рецензии 10.04.2026; принята к печати 10.07.2026.

Received by the editors 11.02.2026; received after the review 10.04.2026; accepted for printing 10.07.2026.