

Шахтные вентиляционные системы в инновационной конструкции контейнерного типа для проектов в Беларуси и Англии

Для калийных рудников в Беларуси и Англии компания CFT GmbH Compact Filter Technic разработала, изготовила и установила шахтные вентиляционные системы в инновационной конструкции контейнерного типа. В дан-

ной статье представлено описание этого оборудования и аргументация того, что инновационная конструкция успешно себя зарекомендовала.

В 2018 и 2019 годах компания CFT GmbH Compact Filter Technic, Гладбек, Германия, поставила специально разработанные и изготовленные системы вентиляции для проходки шахтных стволов двух калийных рудников, которые в настоящее время находятся в процессе строительства или вскрытия: белорусского рудника «Нежинский» компании ИООО «Славкалий» и шахты «Вудсмит» на северо-востоке Англии, принадлежащей компании Sirius Minerals Plc.

В рамках проекта в Беларуси системы вентиляции были поставлены через компанию Redpath Deilmann GmbH, Дортмунд, Германия. Для проекта в Англии поставка осуществлялась на фирму DMC Mining Services (UK) Ltd, Скарборо, Великобритания. Обе компании получили заказы на проходку шахтных стволов. Как в Беларуси, так и в Англии проходческие работы выполняются с использованием оборудования нового поколения для механизированной проходки стволов.

Вентиляция во время проведения работ в шахте осуществляется надземными системами вентиляции, размещенными в контейнерных модулях. Помимо прочего, системы вентиляции обеспечивают, чтобы люди, работающие в шахте, а также оборудование на объекте работали в максимально комфортных атмосферных условиях. Тем самым данные системы вносят существенный вклад в безопасность труда и охрану окружающей среды и здоровья. В то же время они способствуют поддержанию эффективности и долговечности используемого оборудования.

Проходка шахтного ствола в Беларуси

Заказ на строительство ствола на белорусском калийном руднике, который находится примерно в 200 км к югу

от столицы Минска, был получен компанией Redpath Deilmann GmbH в июле 2017 года. Заказ распространяется на проходку двух стволов глубиной 750 м методом замораживания.

Оба ствола диаметром 8 м каждый проходят параллельно двумя стволопроходческими комплексами типа SBR (Shaft Boring Roadheader), разработанными компанией Herrenknecht AG. Машины этого типа имеют на своем нижнем конце поворачиваемую на 360 ° телескопическую барабанную фрезу.

Материал, срезанный режущим барабаном, всасывается по всей его ширине и транспортируется через всасывающие трубы длиной около 30 м во всасывающий бак, который выполняет функцию циклона и отделяет извлеченную породу от воздушного потока. Затем порода передается в бадью и поднимается на поверхность. Содержание пыли во всасывающем воздухе, который не может быть отделен, впоследствии снижается до остаточного содержания пыли $\leq 0,05 \text{ мг/м}^3$ с помощью обеспыливателя компании CFT типа CSBR. Фильтрующая



Рис. 1: Шахтная вентиляционная система компании CFT для Беларуси. (слева направо: калориферный контейнер, вентиляторный контейнер с установленным на нем контейнером управления и охладитель воздуха).

установка смонтирована на SBR и работает на вакууме. Пониженное давление для такого отсасывания срезаемого материала, также называемого пневматической транспортировкой, достигается с помощью трех подключенных в зоне чистого воздуха ротационных воздуховодов, каждая с мощностью привода 315 кВт.

Этот новый тип машины (рис. 1) нашел свое второе применение в Беларуси после того, как в 2012 году был приобретен опыт работы с этой системой при проходке двух стволов для калийного рудника «Янсен» компании ВНР Billiton (1). Для строящегося рудника в Беларуси ожидается при достижении полной эксплуатационной мощности добыча около 1,2 млн. т хлористого калия в год (2).

Требования к шахтной вентиляционной системе

Первые предварительные переговоры между Redpath Deilmann и CFT состоялись еще в июле 2017 года.

Вначале были определены требования к вентиляционной системе, а также дополнительные условия для последующей эксплуатации систем. После расчета необходимых объемов воздуха и путей прохождения воздуха основное внимание при обсуждении технических вопросов было уделено контролю температуры свежего воздуха, который по вентиляционным трубам подается в стволопроходческий комплекс (Рис. 2). Было три основных причины для интенсивных дискуссий по температуре воздуха:

- **Защита замораживаемой горной массы от оттаивания**

Поскольку проходка на первых 160 м осуществляется методом замораживания, то высокая отдача тепла в стволе может привести к частичному оттаиванию замороженного массива. Во время проходки следует исходить из того, что, несмотря на уже выполненное охлаждение машины, техника, встроенная в стволопроходческий комплекс дополнительно может отдавать отходящее тепло в восходящий шахтный воздух из расчета ок. 800 кВт. Температура воздуха в Беларуси летом достигает максимальных суточных значений 30 °С с относительной влажностью 70% на открытом воздухе. Воздух, всасываемый вентиляторами, дополнительно нагревается за счет сжатия. Кроме того, во время подачи воздуха по шахтным вентиляционным рукавам к стволопроходческому комплексу температура воздуха дополнительно повышается. Этот дополнительный нагрев происходит из-за потери тепла стволопроходческого комплекса, которое поднимается вверх по стволу и нагревает вентиляционный рукав. Чтобы избежать отрицательного воздействия тепла на замораживаемую породу и обеспечить температуру, при которой техника, используемая в стволе, может работать без проблем, требовалось охлаждение подаваемого воздуха на поверхности. Цель состоит в том, чтобы обеспечить подачу в шахту как можно более прохладной воздушной струи в виде свежего воздуха, который нагревается за счет теплопритока в стволе до смешанной темпе-



Рис. 2: Стволопроходческий комплекс (SBR) фирмы Herrenknecht AG. Источник: Herrenknecht AG

ратуры, которая не вызывает оттаивание замороженного массива.

- **Осушение воздуха во избежание конденсата**

Другой целью, связанной с охлаждением воздуха, было осушение воздуха. Транспортировка воздуха без предварительного охлаждения или осушения в результате снижения точки росы замороженной стенки ствола приводила бы к образованию конденсата непосредственно на стенках ствола. Кроме того, необходимо избегать образования тумана – в крайних случаях даже осадков – в стволе. При использовании охлаждения рудничного воздуха автоматически осуществляется осушение воздуха, поскольку снижение точки росы происходит уже на змеевиках охладителя воздуха, и конденсат с помощью каплеуловителя удаляется из воздуха, прежде чем он направится дальше в ствол и к стволопроходческому комплексу.

- **Повышение температуры свежего воздуха при эксплуатации в зимний период**

Температуры в зимний период также были приняты во внимание. Согласно климатическим таблицам, в зимние месяцы ожидалась температура -10 °С при относительной влажности 100%. Непосредственно в начале работы, пока еще не достигнута большая глубина и, следовательно, воздухопровод еще не достаточно длинный, воздух в холодное время года может выходить на горизонт ствола со слишком низкой температурой. Поэтому для подогрева воздуха в дальнейшем расчете системы вентиляции был предусмотрен электрический калорифер.

Общие данные	Тип	Шахтная вентиляционная система
	Тип конструкции	Контейнер
	Напряжение питания	400 В
	Длина	ок. 30,0 м
	Ширина	ок. 6,0 м
	Высота	ок. 5,2 м
	Вес брутто	ок. 50 т
	Режим работы	24 ч/сутки, автоматический режим в соответствии с заданным расходом
Блок вентилятора	Тип	2 осевых вентилятора с противовращением рабочих колес GAL 14-900/900
	Режим	нагнетательный
	Расход воздуха	28,0 м ³ /с
	Давление	7.400 Па
	Диаметр рабочего колеса	1.400 мм
	Электрическая мощность	4 x 90 кВт = 360 кВт
Воздухоохладитель	Тип	Спиральный охладитель RWK 2.200
	Мощность охлаждения	2.200 кВт
Воздуонагреватель	Тип	Электрический калорифер
	Электрическая мощность нагрева	520 кВт

Таблица 1: Обзор технических параметров шахтной вентиляционной системы в Беларуси, на каждый ствол.

Наряду с темами, связанными с вентиляцией, важной темой стало эскизное проектирование всей системы. В качестве инновационного решения компания CFT предложила выполнить шахтную вентиляционную систему в контейнерном исполнении. При этом стандартные контейнеры ISO модифицируются таким образом, чтобы в них можно было устанавливать такие компоненты обо-

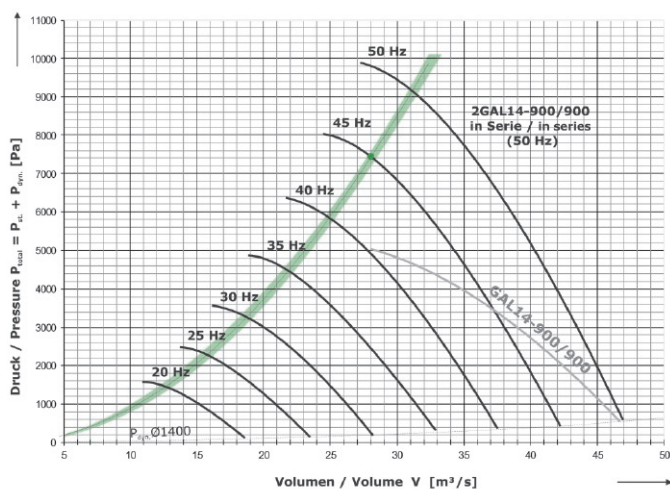


Рис. 3: Кривая вентиляторной станции с двумя осевыми вентиляторами GAL 14-900/900.

рудования, как вентиляторы, обогреватели, охладители воздуха или управляющие электрические устройства. Преимуществами контейнерного типа конструкции являются лучшая защита от шума, более высокая мобильность установок благодаря модульной конструкции и более короткое время сборки на месте. Дополнительным важным преимуществом является экономия затрат на здание, обычно необходимое для защиты компонентов вентиляторной установки от атмосферного воздействия. Контейнерная система может устанавливаться на открытом воздухе и обеспечивать необходимую защиту от атмосферных воздействий для встроенных в нее компонентов и приборов управления.

Концепция и проектирование шахтной вентиляционной системы

Техническое проектирование и выбор необходимых компонентов системы (Таблица 1) выполнялись совместно с компаниями Korfmann Lufttechnik GmbH, Виттен, Германия, и WAT Wärme-Austausch-Technik GmbH, Хамминкельн, Германия.

После определения трасс трубопровода и сопротивлений других, используемых в системе, узлов, был выполнен расчет и выбор необходимых вентиляторов (Рис. 3). Расчет показал, что согласно рекомендациям SIA 196 (3) вентилятор должен иметь производительность 28,0 м³/с, чтобы достичь требуемого объемного потока 25,9 м³/с на горизонте. Общая потеря давления в вентиляционной системе, включая принадлежности и компоненты на поверхности, была рассчитана на 7.400 Па.

Для удовлетворения этого перечня требований использовались два последовательно включенных осевых вентилятора Korfmann с противовращением рабочих колес типа GAL 14 900/900 (рис. 4). При диаметре рабочего колеса 1,40 м и мощности электродвигателя 90 кВт для каждой ступени вентилятора общая мощность вентиляторной станции составляет 360 кВт. Вентиляторы установлены на виброгасителях для обеспе-



Рис. 4: Вентиляторная станция с 2 GAL 14-900/900.



Рис. 5: Заводская сборка шахтной вентиляционной системы для ствола 2.

чения виброизоляции всей системы и контролируются с помощью датчиков. Благодаря установке в полностью звукоизолированном 40-футовом контейнере достигается высокий уровень звукоизоляции. Для обеспечения коротких простоев при обслуживании на боковых стенках контейнеров размещены сервисные дверцы (например, для быстрой замены вентилятора).

Для эффективной и удобной эксплуатации оборудования система управления в автоматическом режиме осуществляет управление установкой в соответствии с заданным объемным расходом. Это достигается путем автоматической регулировки частоты двигателя. Система управления вмонтирована в отдельный 20-футовый контейнер (Рис. 1).

Для получения требуемой мощности охлаждения компания WAT выполнила предварительный расчет прогнозируемой температуры в стволе во время его проходки. В его основу были положены – помимо заявленной расчетной температуры и влажности воздуха в летние месяцы – дополнительный приток тепла от двигателей вентустановки к объемному потоку свежего воздуха и объем тепла, выработанного стволопроходческого комплекса, оказывающий влияние на вентиляционный тру-



Рис. 6: Открытые дверцы вентиляторного контейнера, позади них осевые вентиляторы.

бопровод. Для того чтобы напрямую перехватывать приток тепла от вентиляторов, позади них был установлен охладитель, работающий с избыточным давлением.

Целевая температура за охладителем воздуха была установлена на уровне 4 °С в качестве предельной температуры экономичного охлаждения. По результатам расчетов использовался змеевиковый охладитель с мощностью охлаждения 2.200 кВт. Во время охлаждения при температуре 30 °С с относительной влажностью 70% выделяется около 1.500 литров конденсата в час, который отделяется от воздушного потока каплеотделителем. Особенностью змеевиковых охладителей марки WAT являются низкие потери давления при большой поверхности теплообменника. Холодная вода для работы охладителей воздуха предоставляется имеющимися морозильными установками заказчика.

Чтобы поддерживать постоянную температуру в стволе во время проведения работ в летнее и зимнее время, для дальнейших расчетов калориферной установки была выбрана целевая температура + 2 °С. С помощью дополнительного подвода тепла вентиляторами температура на конце шахтной вентиляционной системы - независимо от времени года - регулируется одинаково.

Электрический калорифер имеет мощность 520 кВт, распределенную на восемь ступеней калорифера. Одна из восьми ступеней калорифера управляется тиристором, в то время как остальные семь ступеней подключаются через контактор. Преимущество такой конфигурации системы заключается в управлении целевой температурой в режиме нагрева с точностью до 0,5 °С. Шкафы управления калорифером размещены централизованно в контейнере управления.

Заводская сборка и монтаж системы вентиляции на шахте

Осенью 2018 года на площадке CFT состоялась комплексная сборка системы вентиляции (Рис. 5 и 6). Общий вес системы ок. 50 т, при этом самый тяжелый системный модуль – вентиляторный контейнер - имеет вес 16,5 т. Системы вентиляции для стволов 1 и 2 были одна за другой установлены и подвергнуты обширным заводским испытаниям для проверки их функций.



Рис. 7: Ввод в эксплуатацию шахтной вентиляционной системы для ствола 2 на руднике в Беларуси.

После того, как вся система была разобрана на отдельные модули для транспортировки, поставка была произведена в соответствии с графиком в ноябре 2018 года. Благодаря модульной конструкции на сборку, включая первый ввод в эксплуатацию, потребовалась всего лишь одна неделя (рис. 7). Обе установки были подключены к системе управления процессами на объекте, чтобы обеспечить постоянный доступ к данным и состоянию систем вентиляции. После ввода в эксплуатацию на руднике было проведено обучение по эксплуатации системы. Проект был успешно завершён в декабре 2018 года с монтажом и вводом в эксплуатацию системы вентиляции для ствола 1.

Проходка ствола в Англии

В октябре 2018 года компания CFT получила еще один заказ на разработку и создание систем вентиляции контейнерного типа для проходческих работ. Партнером проекта в этом случае была компания DMC Mining Services (UK) Ltd., которая получила заказ на проходку четырех стволов для вскрытия рудника «Вудсмит» в Национальном парке Северного Йоркшира.

Два главных ствола будущей полигалитовой шахты в результате должны иметь глубину 1.600 м, а их проходка также осуществляться с помощью стволопроходческих комплексов Herrenknecht SBR. Чтобы соответствовать строгим правилам Национального парка в отношении разрешений на строительство, материал, добываемый через два основных ствола, будет транспортироваться из Национального парка в Тиссайд на северо-восточном побережье Англии через 37-километровый туннель по конвейерной системе. Там происходит дальнейшая обработка и последующая погрузка на судна. Для строительства такого туннеля для транспортировки материала выполняется проходка традиционным способом двух дополнительных стволов глубиной от 250 до 350 м. При полной эксплуатации ожидается объем производства до 20 млн т полигалита в год (4).

Разрешение на разработку рудника на территории Национального парка было выдано с учетом строгих правил по охране природы. Основные требования распространялись, среди прочего, на соответствие уровню звукового давления в различных точках окрестности в диапазоне от 42 до 55 дБА.

Проектирование и заводская сборка шахтной системы вентиляции

Детальное проектирование системы вентиляции началось в октябре 2018 года. В рамках этого процесса каждый из четырех стволов был оснащен станцией для подачи свежего воздуха в ствол, а также станцией для отсоса воздуха из ствола (Рис. 8 и 9). При этом свежий воздух всегда выходит в зоне горизонта ствола, а отсасываемый воздух отводится рядом с устьем ствола.



Рис. 8: Заводская сборка шахтной вентиляционной системы для клетьевого ствола. (слева направо: Контейнер для отсасывающего вентилятора, 2 водоохлаждающие машины с воздушным охлаждением, контейнер для подающего вентилятора с надстроенным контейнером E-House и 2 контейнера охлаждения друг над другом)

Общие данные	Тип	Шахтная вентиляционная система
	Тип конструкции	контейнерный
	Напряжение питания	11.000 В
	Длина	ок. 35,1 м
	Ширина	ок. 13,3 м
	Высота	ок. 5,5 м
	Вес брутто	ок. 86,0 т
	Режим работы	24 ч/сутки
Модуль вентилятора Подающая вентстанция	Тип	2 осевых вентилятора с противовращением рабочих колес + 1 осевой вентилятор
	Режим	нагнетательный
	Расход воздуха	29,2 м ³ /с
	Давление	8.700 Па
	Диаметр рабочего колеса	1.400 мм
	Электрическая мощность	5 x 90 кВт = 450 кВт
Охладитель воздуха	Тип	пластинчатый теплообменник
	Мощность охлаждения	2.000 кВт
Модуль вентилятора Отсасывающая вентстанция	Тип	Осевой вентилятор
	Режим	всасывающий
	Расход воздуха	46,2 м ³ /с
	Давление	1.250 Па
	Диаметр рабочего колеса	1.600 мм
	Электрическая мощность	110 кВт

Таблица 2: Обзор технических данных шахтной вентиляционной системы в Англии, на каждый главный ствол



Рис. 9: Заводская сборка с другого ракурса. (на переднем плане 2 контейнера охлаждения каждый с пластинчатым охладителем 1.000 кВт)

Вентиляционные системы для обоих главных стволов с технической точки зрения идентичны (Таблица 2). Чтобы обеспечить подачу свежего воздуха с объемным расходом 29,2 м³/с при давлении 8.700 Па, используются два последовательно включенных осевых вентилятора Korfmann с противовращением рабочих колес типа GAL 14-900/900 и дополнительный осевой вентилятор типа AL 14-900. Таким образом, подающая вентстанция имеет общую электрическую мощность 450 кВт и размещена в полностью звукоизолированном 40-футовом контейнере. Для дополнительной звукоизоляции был запланирован специально разработанный 10-футовый контейнер с кулисным шумоглушителем на стороне всасывания. Вентиляторы контролируются с помощью датчиков и, кроме того, для развязки со всей системой устанавливаются на виброизоляционные маты.

В отличие от работ по проходке шахтных стволов в Беларуси, проходка стволов в Англии не происходит методом замораживания. Тем не менее, охлаждение воздуха имеет особое значение по двум причинам: во-первых, чтобы обеспечить охрану труда, температура в зоне рабочих площадок стволопроходческого комплекса не должна превышать установленных пределов. Во-вторых, слишком высокая температура окружающей среды не должна приводить к неисправности оборудования, монтированного в стволе. Заказчиком была задана мощность охлаждения 2.000 кВт на ствол, а также использование пластинчатых теплообменников для охлаждения воздуха. Пластинчатые теплообменники состоят из труб с прикрепленными пластинами для увеличения поверхности теплообменника и, тем самым, для обеспечения компактной конструкции. Воздух при прохождении через теплообменник охлаждается на холодных трубах с пластинами. Температура труб с пластинами определяется температурой воды, которая протекает через теплообменник со стороны подключения воды. Конструкция фирмы WAT предусматривает по два теплообменника на ствол мощностью 1.000 кВт. Модули охлаждения воздуха устанавливаются в отдельном 20-футовом контейнере и охлаждают свежий воздух при его прохождении до целевой температуры 4 °С в конце шахтной вентиляционной системы. Теплообменники достигают своей полной производительности в соответствии с техническим проектом при температуре подающей воды 1 °С со стороны входа воды в воздухоохладитель.

Контур холодной воды представляет собой замкнутую систему. Вода, которая вытекает из теплообменников со стороны воды после прохождения через охладитель воздуха, имеет температуру на выходе ок. 12 °С и нагнетается двумя насосами в две водоохлаждающие машины с воздушным охлаждением типа 30ХВР. Затем водоохлаждающие машины с воздушным охлаждением, каждый с мощностью охлаждения 1.000 кВт, охлаждают воду до температуры 1 °С, необходимой для процесса охлаждения воздуха, прежде чем насосы вернут воду в пластинчатые теплообменники.



Рис. 10: Вид в контейнере управления. (слева отсек управления со шкафами управления, справа трансформаторный отсек)

Концепция вентиляции, кроме подачи свежего воздуха, предусматривает дополнительный отсос отработанного воздуха. Указанный объем отсоса 46,2 м³/с достигается за счет использования осевого вентилятора типа AL 16-1100 с диаметром рабочего колеса 1,60 м и мощностью двигателя 110 кВт. Звукоизоляция обеспечивается путем монтажа в звукоизолированном 40-футовом контейнере с дополнительным кулисным шумоглушителем.

Все устройства управления шахтной системой вентиляции, состоящей из подающей вентстанции, охлаждения и отсасывающей вентстанции, были помещены в специально оборудованный 40-футовый контейнер (рис. 10). Поскольку энергообеспечение осуществляется заказчиком с заданным напряжением 11 кВ, потребовалось использование трансформатора. В результате детального проектирования было решено разделить контейнер управления на доступный для входа снаружи

отсек управления, в котором были установлены все необходимые шкафы управления и преобразователи частоты для управления установкой, а также на трансформаторный отсек, куда можно попасть из отсека управления, в котором был установлен требуемый трансформатор с полной мощностью 2.200 кВА.

Заводская сборка шахтных систем вентиляции происходила на площадке компании CFT в период с апреля по август 2019 года, начиная с шахтных вентиляционных систем стволов, необходимых для проходки транспортного тоннеля, и в каждом случае сопровождалась интенсивными заводскими испытаниями.

Выводы по теме применения контейнерной конструкции при проведении проходческих работ в шахтах

При проходке стволов мобильная контейнерная конструкция зарекомендовала себя как экономичное решение, которое предлагает новые возможности применения благодаря гибкому многократному использованию (см. также видео (5)). Когда требуется переместить систему в другое место, быстрая разборка и последующая сборка в непрерывном процессе помогут в соблюдении предписанных сроков. К этому добавляются простота транспортировки и возможность несложного промежуточного хранения. Отсутствие необходимости в защитном сооружении для компонентов системы делает ее использование еще более эффективным. Кроме того, конструкция контейнера соответствует самым высоким стандартам звукоизоляции.

Перечень источников

- (1) Альбрехт, Т. (2019): Проходка двух калийных стволов в Беларуси с применением оборудования нового поколения. 21. Коллоквиум «Буровзрывные технологии» ТУ Клаусталь, материалы конференций, с. 21-30
- (2) Redpath Deilmann GmbH: Новый подряд на строительство двух замораживаемых стволов в Беларуси. Пресс-релиз от 17 июля 2017 г. Online: [https://www.deilmann-haniel.com/index.php?id=52&tx_ttnews\[tt_news\]=46&cHash=fffe980e60c53ae01e769c409d39872a](https://www.deilmann-haniel.com/index.php?id=52&tx_ttnews[tt_news]=46&cHash=fffe980e60c53ae01e769c409d39872a)
- (3) SIA 196: 1998-11: Вентиляция в подземном строительстве
- (4) Sirius Minerals Plc: Наш бизнес. Online: <https://www.siriusminerals.com/about-us/our-business>
- (5) CFT GmbH Compact Filter Technik: Контейнерная шахтная система вентиляции. Видео. Online: <https://www.cft-gmbh.de/video-shaftsinking>

Авторы

Патрик Шнайдер, CFT GmbH Compact Filter Technik, Гладбек, Германия