

АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЙ СУШКИ УГЛЯ ДЛЯ ИХ ПРИМЕНЕНИЯ В ПОДЗЕМНОЙ ГИДРОДОБЫЧЕ

А. А. Кравцов[✉], В. А. Атрушкевич

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем комплексного освоения недр
им. академика Н. В. Мельникова Российской академии наук,*

г. Москва, Российская Федерация

✉ havok.08@mail.ru

Аннотация: Рассмотрены современные технологии, применяемые для сушки угля, такие как барабанные сушилки, пневмосопловые аппараты, устройства псевдоожиженного слоя и устройства контактной сушки. Проведен анализ параметров их работы и конструктивных особенностей с целью оценки применимости этих технологий в условиях подземной гидродобычи угля. Авторы отмечают, что, несмотря на несколько худшие показатели по удельным энергозатратам на 1 т осушенного угля, для подземных условий предпочтительными являются пневмосопловые аппараты и контактной сушки ввиду их меньших габаритов, а также делают вывод о перспективности развития устройств контактной сушки для осушения мелких фракций угля.

Ключевые слова: сушка угля, подземная гидродобыча, контактная сушка

Благодарности, признательность, финансирование: Авторы выражают благодарность сотрудникам отдела моделирования и управления горнотехническими системами Института проблем комплексного освоения недр имени академика Н. В. Мельникова Российской академии наук за консультации и помощь в проведении исследований.

Для цитирования: Кравцов АА, Атрушкевич ВА. Анализ технологий сушки угля для их применения в подземной гидродобыче. *Маркшейдерия и недропользование*. 2025;25(4):16-22. <https://doi.org/10.56195/20793332-2025-25-4-16-22>.

ANALYSIS OF COAL DEWATERING TECHNOLOGIES FOR UNDERGROUND MINING APPLICATIONS

A. A. Kravtsov[✉], V. A. Atrushkevich

*Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources Russian Academy of Sciences. Moscow,
Russian Federation*

✉ havok.08@mail.ru

Abstract: Article provides review of modern research of coal dewatering technologies, such as drum drying, tube drying, boiling layer and convection drying. Presented working parameters and constructive characteristics analysis of mentioned technologies to assess their applicability in underground hydraulic coal mines. Authors conclude that despite worse energy efficiency per ton dried, tube and convection dryers are better applicable for underground conditions due to smaller size. Also authors note perspectives of further contact dryers development for dewatering of coal fines.

Keywords: coal dewatering, underground hydraulic mining, conduction drying

Acknowledgments, Funding, Financial Support: The authors express gratitude to the staff of the Department of “Modeling and Control of Mining Technical Systems” of the Institute for Problems of Integrated Development of Subsoil named after. Academician N. V. Melnikov of the Russian Academy of Sciences for consultations and assistance in conducting research.

For citation: Kravtsov AA, Atrushkevich VA. Analysis of coal dewatering technologies for underground mining applications. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2025;25(4):16-22. (In Russ.). <https://doi.org/10.56195/20793332-2025-25-4-16-22>.

Введение

Развитие рыночных отношений между предприятия-ми ставит на повестку дня вопрос о повышении качества выпускаемой продукции, что оказывает влияние на формирование договорных и оптовых цен, а следовательно, на эффективность работы предприятия в целом. Одной из характеристик качества продукции угледобывающих и углеперерабатывающих предприятий является влажность. Вопрос снижения влажности добываемого угля приобретает особую актуальность в связи с увеличением масштабов применения гидродобычи и гидротранспорта, обусловленным переходом «сухих» шахт к локальной и полной отработке запасов гидромеханизированным способом на основе использования технологии с замкнутым циклом подземного обезвоживания и осветления технологической воды.

В настоящее время разработан и используется широкий спектр способов и технических средств, обеспечивающих снижение влажности добываемого угля [1–4]. Важное место среди них занимают технологии и аппараты сушки угля, получившие широкое распространение на перерабатывающих предприятиях. Однако, как показывает анализ, не все существующие сушильные аппараты ввиду специфики и ряда свойственных им недостатков, таких как сложность организации технологического процесса, ограниченная производительность, конструктивная сложность, металлоемкость и высокая стоимость оборудования могут быть использованы в составе комплексов угольных шахт [5–11]. В данной работе проведен анализ различных технологий сушки угля для их применения в современных автоматизированных комплексах подземной гидродобычи.

Цель исследований: анализ применимости различных технологий сушки угля для автоматизированной подземной гидродобычи.

Объект исследования: технологии сушки угля, такие как барабанные сушилки, пневмосопловые аппараты устройства псевдоожиженного слоя и устройства контактной сушки.

Метод исследования

Методами исследований выступают поиск и синтез данных из научных статей, отчетов и литературы, отражающих современное применение технологий сушки угля, сравнительный анализ технологий для условий подземной гидродобычи.

Результаты исследования и их обсуждение

Устройства и аппараты для сушки угля нашли широкое применение в добывающей и перерабатывающих отраслях промышленности. При этом технология и техника сушки зачастую тесно увязываются с основными технологическими процессами конкретного производства, что вместе с сохраняющейся тенденцией повышения интенсивности сушки приводит к постоянному совершенствованию конструкций сушильных аппаратов и устройств. Значительное распространение в технологии углеобогащения получила сушка угля в барабанных сушилках [12, 13].

Осушение происходит за счет обдувания породы горячим газом. Для повышения эффективности процесса уголь перемешивается в барабане. Существующие сушилки с барабанами диаметром 2,8 м, длиной 14 м и диаметром 3,5 м, длиной 18, 22 и 27 м используются в промышленности.

Устройство барабанной сушилки приведено на рисунке 1.

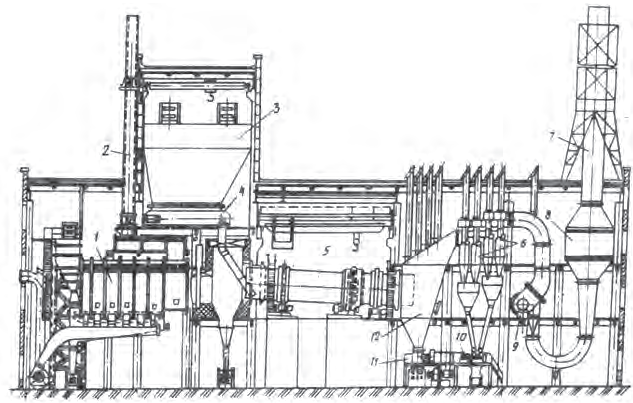


Рис. 1. Устройство барабанной сушилки: 1 – печь; 2 – воздухопровод; 3 – накопитель породы; 4, 11 – питатели; 5 – барабан; 6, 8 – пылеуловители; 7, 9 – отводы продуктов сгорания; 10 – запирающий шлюз; 12 – выход готового продукта /
Fig. 1. Coal drum dryer scheme: 1 – furnace; 2 – air intake; 3 – coal storage; 4, 11 – feeders; 5 – drum; 6, 8 – dust collectors; 7, 9 – combustion gas exhaust; 10 – separator gate; 12 – output

Технология сушки угля в барабанных сушилках состоит в следующем. Сырой уголь попадает в бункер 3, из которого посредством скребкового питателя 4 поступает в сушильный барабан. Ввиду перепада давления, создаваемого дымососом 9, атмосферный воздух через растопочную трубу попадает в топку 1, оттуда уже в нагретом состоянии поступает в барабан. После сушки угля в барабане отработанный воздух пропускается через систему пылеуловителей 6, 8 и через дымовую трубу 7 выбрасывается в атмосферу. Высушенный уголь из барабана попадает в разгрузочную камеру 12.

Для удаления 1 кг влаги из породы барабанные сушилки используют от 4 200 до 6 500 кДж тепловой энергии и 19–76 кВт·ч электроэнергии [14]. Параметры работы сушилок с различными размерами барабанов приведены в таблице 1.

Таблица 1 / Table 1
Параметры работы барабанных сушилок /
Coal drum dryer working parameters

Параметр / Parameter		Значение для размера барабана, м / Value for different drum size, m			
		2,8 x 14	3,5 x 18	3,5 x 22	3,5 x 27
Производительность, т/ч / Performance, t/h	По исходному углю / by input coal	90	151	170	230
	По испаренной влаге / by evaporated water	9,5	20	26	27
Влажность угля, % / Coal moisture, %	Начальная / initial	18,5	20	17	16,5
	Конечная / final	9	7,8	7	5,7
Температура газов, °C / Gas temperature, °C	Начальная / initial	750	700	750	800
	Конечная / final	80	105	90	80
Состав концентрата, % / Concentrate fraction, %	Мелкий флотационный / fine flotating	55	65	70	81,5
		45	35	30	18,5

Производительность барабанной сушилки заметно возрастает с увеличением частоты вращения барабана и при размещении в нем рациональных внутренних устройств, включая цепные насадки разного типа. Опыты, проведенные на промышленных барабанных сушилках на ЦОФ «Чумаковская», ГОФ «Горняцкая», Череповецком металлургическом заводе и Магнитогорском металлургическом комбинате, подтвердили возможность интенсификации сушки в результате повышения начальной температуры и скорости газов.

С целью повышения интенсивности процесса сушки флотационного концентрата в барабанных сушилках УкрНИИ углеобогащения совместно с работниками обогатительных фабрик и наладочных организаций разработано цепное насадочное устройство, которое обеспечивает в результате повышения взвешенности угля в барабане увеличение производительности на 20–30 % [15].

Основные показатели работы барабанных сушилок с цепными насадками приведены в таблице 2.

Таблица 2 / Table 2

**Параметры работы барабанных сушилок
с цепными насадками /
Working parameters of coal drum dryer with chain mixer**

Параметр / Parameter	Значение / Value
Производительность, т/ч / Performance, t/h	По исходному углю / by input coal
	377,4
	По испаренной влаге / by evaporated water
	28
Влажность угля, % / Coal moisture, %	Начальная / initial
	Конечная / final
Температура газов, °C / Gas temperature, °C	Начальная / initial
	Конечная / final

Применение цепных насадок значительно интенсифицирует процесс сушки в барабанных сушилках, особенно таких влагоемких продуктов обогащения, как флотационный концентрат и угольный шлам.

В зарубежной практике барабанные сушилки применяют для сушки угольных шламов. Французской фирмой «Вено-Пик» была представлена сушилка Multitube, способная осушать до 400 т угля в час (рис. 2).

Барабан разделен на две секции. В первой размещены винтовая насадка для подъема породы, а также насадки с гребками, навешенными на вал. Вторая секция барабана состоит из шести труб длиной 20 м и диаметром 2,13 м. В трубах размещены периферийные пересыпные лопасти [16].

Несмотря на широкое применение барабанных сушилок в технологии углеобогащения, использование их в составе поверхностных комплексов шахт представляется нерациональным ввиду громоздкости конструкций, значительных капитальных затрат, сложной организации процесса сушки.

Другой распространенной технологией является сушка в трубах-сушилках. Трубы-сушилки относятся к сушильным аппаратам с конвективным теплообменом и прямоточным движением газов и материала. Аппарат состоит из трубы, соединенной с сепаратором или циклоном (рис. 3).

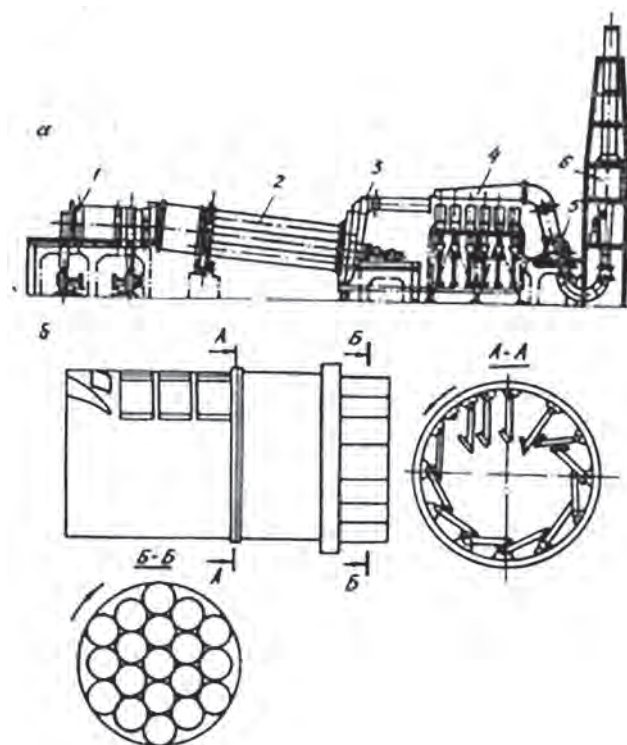


Рис. 2. Барабанная сушилка Multitube: 1 – печь; 2 – барабан; 3 – выход готового продукта; 4 – циклоны; 5 – отвод продуктов сгорания; 6 – пылеуловитель /
Fig. 2. Drum dryer Multitube: 1 – furnace; 2 – drum; 3 – output; 4 – cyclones; 5 – combustion gas exhaust; 6 – dust collector

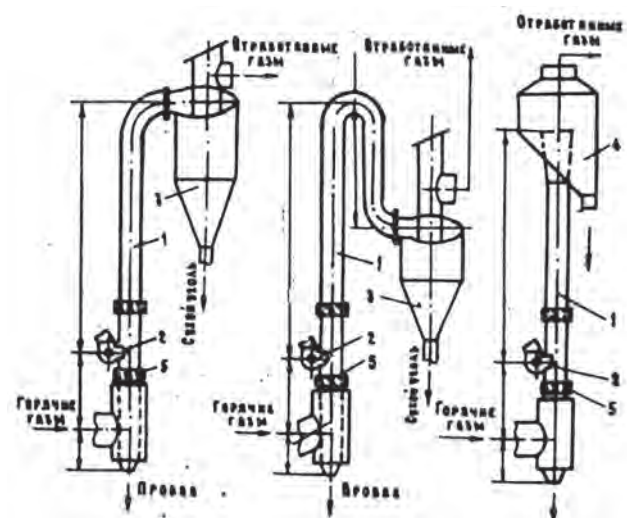


Рис. 3. Различные варианты конструкции труб-сушилок: 1 – труба; 2 – питатель; 3 – циклон; 4 – сепаратор; 5 – компенсатор /
Fig. 3. Different constructions of tube dryer: 1 – tube; 2 – feeder; 3 – cyclone; 4 – separator; 5 – compensator

Движение теплоносителя (газа) идет снизу вверх по трубе, потоком захватывая породу из питателя. В процессе движения породы по трубе происходит осушение. Далее, попадая в циклон, порода отделяется от теплоносителя [17].

Корректная работа такого сушильного аппарата возможна при соблюдении трех условий:

Порода должна быть довольно мелкой, чтобы ее возможно было транспортировать потоком газа.

Объем отводимой влаги должен быть сопоставим с объемом подаваемого газа.

Обводненность породы должна быть такой, чтобы за короткий срок ее пребывания в сушильной камере достигалась требуемая конечная влажность [18, 19].

Существующая тенденция развития сушильной технологии заключается в стремлении к максимальной интенсификации сушки, что при применении труб-сушилок может достигаться в результате таких стандартных приемов, как повышение температурного потенциала, увеличение расхода подаваемого теплоносителя, а также увеличение относительных скоростей между сушильным агентом и частицами сушеного материала.

Преимуществами использования труб-сушилок являются простота конструкции стационарно устанавливаемой сушилки, сравнительно низкие капитальные затраты. К недостаткам данной технологии следует отнести сложность сушки материала во взвешенном состоянии, которая заключается в непрерывном изменении гидродинамических условий двухфазного потока. Эти условия изменяются неодинаково по пути движения потока и по отношению к разным по размеру частицам материала. Характер изменения указанных условий до последнего времени устанавливается на основе эмпирических данных.

Недостатком труб-сушилок является относительно высокая влажность получаемого в результате сушки продукта – 18–20 %. Для каменного угля технология паровой сушки не получила применения.

Возможность интенсификации процесса сушки в трубах-сушилках ограничена необходимостью активизации аэродинамического режима. Однако при увеличении скорости перемещения частиц значительно повышается абразивный износ стенок аппарата, сокращающий срок его службы. Интенсификация процесса тепло- и массопереноса с одновременным уменьшением влияния указанного выше недостатка может осуществляться при использовании эффекта срыва влаги с частиц сушеного материала высокоскоростным газовым потоком, который реализуется при сушке в пневмосопловых аппаратах.

Из пневмосопловых сушилок наибольшее распространение получили аппараты типа трубы Вентури, схемы которых приведены на рисунке 4.

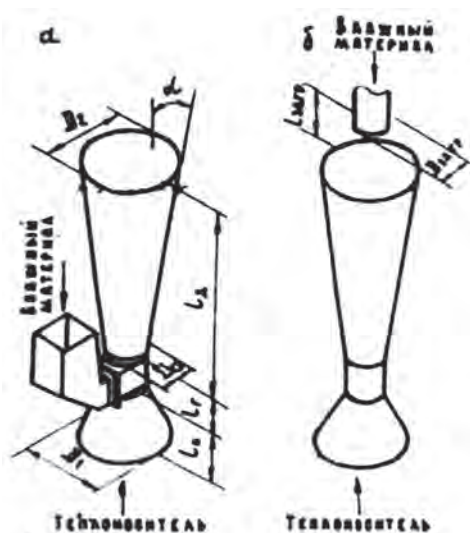


Рис. 4. Схемы прямоточных (а) и противоточных (б) пневмосопловых аппаратов типа трубы Вентури /
Fig. 4. Scheme of direct-flow (a) and counterflow (b) Venturi tube dryers

Преимущество такой конструкции заключается в повышении скорости газа в горловине. При этом создается эффект срыва водяной пленки с поверхности угольных частиц и последующий перевод сорванной влаги в туманообразное состояние. Технология сушки угля в аппаратах типа трубы Вентури позволила в 3–4 раза интенсифицировать процесс конвективной сушки, создать малогабаритные аппараты большой единичной мощности.

Эффективность сушки угля в трубах Вентури можно оценить, проанализировав основные параметры работы прямоточного пневмосоплового аппарата, приведенные в таблице 3.

Таблица 3 / Table 3

Параметры работы прямоточной пневмосопловой сушилки /
Direct-flow Venturi tube dryer working parameters

Параметр / Parameter		Значение / Value				
Производительность по испаренной влаге, кг/ч / Performance by evaporated water, kg/h		417	389	458	473	450
Температура, °C / Temperature, °C	Газа начальная / gas initial	1 190	1 200	1 178	1 184	1 184
	Газа конечная / gas final	109	105	100	85	104
	Материала начальная / material initial	15	15	15	15	15
	Материала конечная / material final	64	64	60	72	62
Влажность материала, % / Material moisture, %	Начальная / initial	11,9	12	12,3	12,6	12,1
	Конечная / final	5,4	5,8	4,7	4,5	5
Влагонапряжение объема, кг/м³·ч / Volume moisture stress, kg/m³·h		3 475	3 241	3 816	3 941	3 450

В аппаратах Вентури влагонапряжение объема достигает 3 250–3 900 кг/м³·ч в отличие от труб-сушилок, влагонапряжение которых не превышает 1 300 кг/м³·ч. Результаты работы пневмосопловой сушилки, приведенные в таблице 4, показывают, что интенсификация процесса в значительной мере определяется температурой вводимых в аппарат газов.

Таблица 4 / Table 4

Производительность прямоточной пневмосопловой сушилки при различных начальных температурах /
Direct-flow Venturi tube dryer performance for different initial temperatures

Параметр / Parameter		Значение / Value			
Начальная температура, °C / Initial temperature, °C		400	600	1 200	1 300
Производительность по влажному материалу, кг/ч / Performance by wet material, kg/h		1 700	3 000	6 000	6 550
Влажность антрацита, % / Anthracite moisture, %	Начальная / initial	12,1	11,9	12,2	13,4
	Конечная / final	3	4,8	4,2	4,7

Применение пневмосопловых сушильных аппаратов позволяет сократить затраты на строительство и эксплуатацию сушильных установок в сравнении с ранее рассмотренными способами сушки. К недостаткам сушилок типа трубы Вен-

тури следует отнести ограниченную продолжительность сушки, ввиду чего необходимо разогревать газ до высоких температур, что может повлечь возгорание угля в случае некорректной остановки сушилки. Также к недостаткам можно отнести большой расход газа, который загрязняет окружающую воздушную среду, если не предусмотрена его очистка.

Устранить такие недостатки пневмосопловых аппаратов, как малая продолжительность сушки и малый диапазон ее регулирования, позволяет использование сушилок псевдоожиженного слоя. Сушке в аппаратах этого типа подвергаются материалы, время сушки которых составляет десятки секунд или минут. Сушка в этих аппаратах происходит за счет прохождения горячих газов через тонкий слой материала, равномерно распределенный на решетке. При этом материал постоянно перемешивается потоком газа, что приводит его в состояние, близкое к жидкому – псевдоожиженное состояние [20]. Определенным диапазонам значений скорости протекания или удельного расхода газов соответствуют основные режимы псевдоожижения и состояния слоя материала (табл. 5).

Таблица 5 / Table 5

Параметры различных режимов псевдоожижения /
Parameters of different regimes of pseudo-liquefaction

Удельный расход отработанных газов, тыс. м³/т·ч / Specific exhaust of gas, thousands of m³/t·h	Режим псевдоожижения / Mode of pseudo-liquefaction	Состояние псевдоожиженного слоя / State of pseudo-liquefied layer
10–15	Пузырьковый, струйный / Bubbling, jet	Кипящий / Boiling
15–20	Развитый струйный / Developed jet	Взвешенный / Suspended
20–30	Форсированный струйный / Forced jet	Аэрофонтанирующий / Airgushing

В соответствии с указанными режимами разработаны и используются сушильные устройства, в которых реализуются различные состояния псевдоожиженного слоя. Камера сушилок, работающих в режиме «кипящего» слоя, разделена на две части. В нижнюю часть, облицованную огнеупорным материалом, подается горячий газ, а решетка со слоем породы находится в верхней части [21, 22]. Примером такого агрегата является сушильная установка ЦОФ «Свердловская» (рис. 5). Она состоит из двух параллельных линий пылеулавливания, каждая из которых имеет одиночный циклон, батарейный пылеуловитель и мокрый пылеуловитель; тягодутьевых машин, включающих в себя два мельничных вентилятора с электродвигателями мощностью по 500 кВт и два дымососа с электродвигателями мощностью по 300 кВт. Топка и нижняя часть сушильной установки работают под давлением 5–6 кПа, верхняя часть – под разрежением 0,06 кПа.

«Кипящий» и «взвешенный» слои образуются гидродинамическими силами газового потока, продуваемого через слой. Такой способ создания псевдоожиженного слоя, хотя и характеризуется относительной простотой и эффективностью, имеет ряд существенных недостатков: жесткую зависимость между тепловым процессом и гидродинамическими параметрами газового потока, неоднородную структуру кипящего слоя, а также значительный вынос мелких частиц из аппарата. Одним из путей устранения указанных недо-

статков или снижения их вредного влияния является применение принципа виброкипения. В устройствах с виброкипящим слоем псевдоожижение достигается не только путем пропускания газа через слой материала, но также и в результате механических вибрационных воздействий на слой, при которых представляется возможным осуществлять подачу теплоносителя и снизу, и сверху материала.

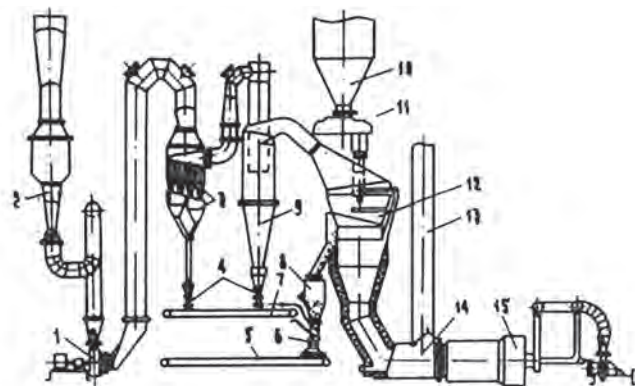


Рис. 5. Сушильная установка кипящего слоя центральной обогатительной фабрики «Свердловская»: 1 – отвод продуктов сгорания; 2, 3 – пылеуловители; 4 – запирающий шлюз; 5, 7 – конвейерные ленты; 6 – питатель; 8 – выход готового продукта; 9 – циклон; 10 – накопитель породы; 11 – питатель; 12 – решетка; 13 – воздухопровод; 14 – соединительные трубы; 15 – печь /

Fig. 5. Boiling layer dryer «Sverdlovskaya»: 1 – combustion gas exhaust; 2, 3 – dust collectors; 4 – separator gate; 5, 7 – conveyor belts; 6 – feeder; 8 – output; 9 – cyclone; 10 – coal storage; 11 – feeder; 12 – grid; 13 – air intake; 14 – uptake; 15 – furnace

По мнению ряда исследователей, использование принципа псевдоожижения является наиболее перспективным для создания сушильных устройств большой единичной мощности для сушки продуктов мокрого обогащения угля [23]. Однако увеличение мощности аппаратов этого типа предъявляет повышенные требования к их надежности, так как при неравномерном распределении псевдоожиженного слоя по площади газораспределительной решетки образуются застойные и малоподвижные зоны.

Проблемным элементом конструкции таких сушилок выступает решетка, которая находится в постоянном тепловом напряжении. С целью уменьшения износа газораспределительных решеток и снижения опасности возгорания находящегося на них угля обычно устанавливают температуру тазов не более 550–600 °С. Кроме названных недостатков, следует также отметить капиталоемкость, металлоемкость, низкую мобильность, конструктивную сложность и громоздкость установок для сушки угля в псевдоожиженном слое.

Все приведенные выше способы сушки и устройства по их реализации можно условно отнести к аппаратам и технологиям с конвективным теплообменом. Теплоносителем, как правило, является нагретая газовоздушная смесь, непосредственно контактирующая с частицами высушиваемого материала. Далее рассмотрены способы и аппараты контактной сушки, в которых тепло материалу передается от нагретой контактирующей с ним поверхности [24, 25].

Разновидностью аппаратов контактной сушки являются шнековые сушилки. В США и Канаде для сушки отходов флотации после их механического обезвоживания широко применяются шнековые сушилки фирмы Holo-Flite (рис. 6).

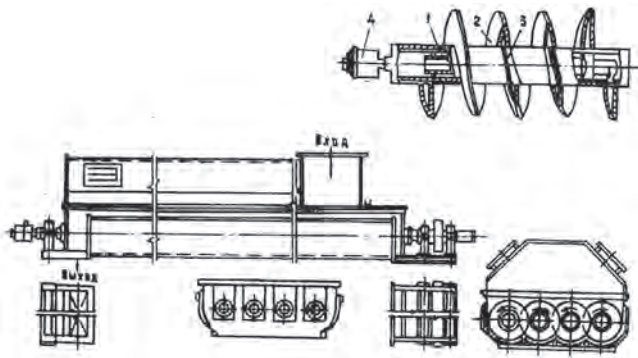


Рис. 6. Контактная сушилка фирмы Holo-Flite: 1 – шнек; 2 – компенсатор; 3 – пустотелый вал; 4 – подшипник /

Fig. 6. Holo-Flite contact dryer: 1 – feed-screw; 2 – compensator; 3 – hollow shaft; 4 – bearing

Сушка происходит за счет кондуктивного теплообмена между шнеком и породой. Подвод тепла осуществляется посредством теплоносителя, протекающего внутри вала шнека. Материалом шнеков и подшипников выступает жаропрочная сталь. Шнеки приводятся в движение гидравлическими приводами индивидуально либо попарно. Теплоносителем обычно выступает синтетическое масло с высокой температурой кипения. Шнеки вращаются со скоростью 4–15 об/мин. Для удаления 1 кг шнековая сушилка использует от 4 500 до 5 500 кДж тепловой энергии до 16 кВт·ч электроэнергии.

В устройствах данного типа достигается равномерная влажность материала и незначительное пылеобразование. Недостатками являются сложность ремонта и эксплуатации установки.

Закключение

1. В статье рассмотрены технологии барабанной сушики, пневмосопловые аппараты, устройства псевдоожиженного слоя и устройства контактной сушики. Не все рассмотренные технологии могут применяться в условиях подземной гидродобычи, некоторые, например устройства барабанной сушики,

обладают значительными габаритами, что осложняет их размещение в подземных выработках. Для этого лучше подходят пневмосопловые и контактные сушилки.

2. Недостатки, присущие применяемым в отрасли технологиям и средствам механизации сушки угля, не обеспечивают возможности их эффективного использования для снижения влажности мелких угольных фракций в поверхностных комплексах гидрошахт и гидроучастков шахт с обычной технологией.

3. Перспективным направлением снижения влажности мелких угольных фракций является использование технологии контактной сушки.

Выводы

Анализ рассмотренных технологий и средств механизации процесса сушки угля, применявшихся на обогащательных фабриках и других промышленных предприятиях в СССР и за рубежом, позволяет сделать следующие выводы:

Установки барабанной сушики и устройства псевдоожиженного слоя нецелесообразно применять в условиях подземной гидродобычи ввиду их крупных габаритов. Пневмосопловые аппараты и устройства контактной сушики лучше подходят для размещения в подземных выработках.

Существующие устройства для сушки угля обладают рядом недостатков, не позволяющих эффективно использовать их для подсушивания мелких фракций угля до кондиционной влажности в поверхностных технологических комплексах гидрошахт и гидроучастков шахт с обычной технологией.

Разработку новых конструкций сушильных аппаратов необходимо вести на основе технологии контактной сушки, обеспечивающей более высокую интенсивность процесса в сравнении с установками конвективного теплообмена.

Разработку сушильных устройств для обозначенных условий необходимо вести в соответствии с требованиями обеспечения контактности, мобильности, простоты конструкции, низких капитальных и эксплуатационных затрат, надежности эксплуатации и экологической чистоты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Саломатов ВВ, Карелин ВА. Обзор современных методов сушки углей с оценкой их эффективности. *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2024; 335 (5): 182-193. [Salomatov VV, Karelin VA. Review of modern coal dewatering methods with their efficiency assessment. *News of Tomsk polytechnical state university*. 2024; 335 (5): 182-193. (In Russ.).]
2. Karthikeyan M, Zhonghua W, Mujumdar AS. Low-rank coal drying technologies – current status and new developments. *Drying Technology*. 2009; 27 (3): 403-415.
3. Rao Z, Zhao Y, Huang C, et al. Recent developments in drying and dewatering for low rank coals. *Progress in Energy and Combustion Science*. 2015; 46: 1-11.
4. Osman H, Jangam SV, Lease JD, et al. Drying of low-rank coal (LRC) – a review of recent patents and innovations. *Drying Technology*. 2011; 29 (15): 1763-1783.
5. Rahman M, Kurian V, Pudasainee D, et al. Comparative study on lignite coal drying by different methods. *International Journal of Coal Preparation and Utilization*. 2020; 40: 2: 90-106.
6. Кириллов КМ, Пикалов МФ. Термическая сушка угля – ренессанс технологии. *Уголь*. 2012; 12: 86-88. [Kirilov KM, Pikalov MF. Thermal coal drying – renaissance of technology. *Coal*. 2012; 12: 86-88. (In Russ.).]
7. Yang X, Zhao Y, Luo Z, et al. Brown coal drying processes-a review. *2011 International Conference on Materials for Renewable Energy & Environment*. 2011; 1: 377-381.
8. Yan J, Han X. Advances in Coal Drying. *Drying of Biomass, Biosolids, and Coal*. CRC Press, 2019: 135-164.
9. Violidakis I, Drosatos P, Nikolopoulos N. Critical review of current industrial scale lignite drying technologies. *Low-rank coals for power generation, fuel and chemical production*. 2017: 41-71.
10. Noble A, Luttrell GH. A review of state-of-the-art processing operations in coal preparation. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2015; 25 (4): 511-521.
11. Parekh BK. Dewatering of fine coal and refuse slurries-problems and possibilities. *Procedia Earth and Planetary Science*. 2009; 1 (1): 621-626.
12. Ахунбаев АА, Хусанбоев МАУ. Влияние вращения сушильного барабана на распределение материала. *Universum: технические науки*.

2022; 4-2 (97): 16-24. [Akhnubaev AA, Khusanboev MAU. Influence of drying drum rotation on material distribution. *Universum: technical sciences*. 2022; 4-2 (97): 16-24. (In Russ.)].

13. Kang M, Bian J, Li B, et al. Advanced progress of numerical simulation in drum drying process: Gas-solid flow model and simulation of flow characteristics. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2024; 157: 107758.

14. Marbun AG, Dwiyanoro BA, Tarmizi AM. Study of coal drying characteristics using boiler blowdown in a rotary coal dryer. *JMES The International Journal of Mechanical Engineering and Sciences*. 2022; 6 (1): 37-45.

15. Слесарев ЮИ, Филиппов ВА. Устройство, эксплуатация и ремонт оборудования сушильных установок. Москва, 1990: 191. [Slesarev UI, Filipov VA. Structure, use and repair of drying devices. Moscow, 1990: 191. (In Russ.)].

16. Филиппов ВА. Конструкция, расчет и эксплуатация устройств и оборудования для сушки минерального сырья. Москва, 1979: 313. [Filipov VA. Construction, design and use of devices for minerals drying. Moscow, 1979: 313. (In Russ.)].

17. Хашина НВ. Теплообменные процессы при сушке угля горячим газом. *Химия твердого топлива*. 2005; 6: 45-53. [Hashina NV. Heat exchange processes in hot gas coal drying. *Chemistry of solid fuel*. 2005; 6: 45-53. (In Russ.)].

18. Chen Z, Wu W, Agarwal PK. Steam-drying of coal. Part 1. Modeling the behavior of a single particle. *Fuel*. 2000; 79(8): 961-974.

19. Синицын НН, Запатрина НВ, Грибкова ЮВ и др. Математическое моделирование сушки плотного слоя кусков угля, продуваемого отходящими газами котлоагрегатов. *Вестник кибернетики*. 2023; 22 (2): 92-99. [Sinitin NN, Zapatrina NV, Gribkova UV, et al. Mathematical modeling of drying of thick coal layer blown through with boiler exhausted gases. *News of cybernetics*. 2023; 22 (2): 92-99. (In Russ.)].

20. Ван Ч, Ван Д, Чхэнь Ц и др. Изучение механизма тонкослойной сушки и диффузии низкосортного угля Внутренней Монголии и провинции Юньнань. *Записки Горного института*. 2024; 266: 326-338. [Van C, Van D, Chen C, et al. Study of thin-layer drying mechanics and diffusion of low-grade coal in Inner Mongolia and Junjan province. *Notes of Mining institute*. 2024; 266: 326-338. (In Russ.)].

21. Halim A, Widyanti AA, Wahyudi CD, et al. A Pilot Plant Study of Coal Dryer: Simulation and Experiment. *ASEAN Journal of Chemical Engineering*. 2022; 22 (1): 124-140.

22. Гарбер В, Козлов В, Кириллов К. Условия безопасной работы аппаратов термической сушки угля. *Уголь*. 2014; 6: 62-65. [Garber V, Kozlov V, Kirillov K. Condition of coal thermal dryers safe operation. *Coal*. 2014; 6: 62-65. (In Russ.)].

23. Somov AA, Tugova AN, Makarushin MN, et al. Coal slurry drying process research. *Thermal Engineering*. 2018; 65: 555-561.

24. Катянин МС, Бочкарев ВА. Анализ способов сушки угля при подготовке его к сжиганию. *Повышение эффективности производства и использования энергии*. 2022: 147. [Katyatin MS, Bochkarev VA. Analysis of coal drying method for its burning preparation. *Increase of energy use and production efficiency*. 2022: 147 (In Russ.)].

25. Zheng C, Yao Q, Li X, et al. Experimental investigation of mechanical characteristics of coal samples at different drying temperatures. *Drying Technology*. 2022; 40 (16): 3483-3495.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Алексей Александрович Кравцов – аспирант, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н. В. Мельникова Российской академии наук, 111020, г. Москва, Российская Федерация, e-mail: havok.08@mail.ru



Виктор Аркадьевич Атрушкевич – доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник отдела моделирования геотехнических систем, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н. В. Мельникова Российской академии наук, 111020, г. Москва, Российская Федерация, e-mail: iugi@mail.ru



ABOUT THE AUTHORS

Alexey A. Kravtsov – Postgraduate Student, Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources Russian Academy of Sciences, 111020, Moscow, Russian Federation, e-mail: havok.08@mail.ru

Victor A. Atrushkevich – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Leading Research Scientist of the Department of Design Theory of Subsoil Development, Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources Russian Academy of Sciences, 111020, Moscow, Russian Federation, e-mail: iugi@mail.ru

Критерии авторства / Contribution: Авторы заявляют о равном вкладе каждого в работу над статьей / The authors participated equally in the writing and collection of the material, as well as its processing.

Конфликт интересов / Conflict of interest: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

Информация о статье: Поступила в редакцию: 20.05.2025. Поступила после рецензирования: 01.08.2025. Принята к публикации: 03.08.2025.

Article info: Received: 20.05.2025. Revised: 01.08.2025. Accepted: 03.08.2025.