

УДК 622.818:622.7.004.8:621.67.001.24

Е.В. Семененко, д-р техн. наук, В.Д. Рубан, К.К. Подоляк

(Украина, г. Днепропетровск, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины)

ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДА РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ НАСОСОВ ДЛЯ ПЕРЕКАЧИВАНИЯ ВОДОУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА

Украина обладает одной из наиболее мощных теплоэнергетических систем в Европе. При этом кроме котельных, тепловых электростанций и теплоэлектроцентралей, удовлетворяющих спрос со стороны коммунальных служб, в стране имеется значительное количество промышленных предприятий, которые

потребляют как тепловую, так и электрическую энергию. С учетом исторически сложившихся обстоятельств, все тепло- и электрогенерирующие мощности страны ориентированы на потребление природного газа, что делает их импортнозависимыми и нерентабельными в существующих условиях. Объявленная в энергетической стратегии Украины тенденция перехода на водоугольное топливо (ВУТ), исключающее использование мазута и природного газа даже для подсветки котлов, работающих на угле, открывает новые перспективы для технологий утилизации угольных шламов в виде пульпы высокой концентрации [1, 2]. Ряд отечественных, а также зарубежных, специалистов отмечают, что наиболее рациональным является комплексный подход при использовании ВУТ, который включает в себя [1, 3 – 6]: снижение удельных энергозатрат на транспортирование пульпы и энергоёмкости производства за счет перехода к более высоким концентрациям твердых частиц и повышенным грузопотокам; повышение экологической безопасности существующих технологий за счет снижения загрязнений окружающей среды, вызванных несовершенными методами сжигания угольного топлива, и переработки отходов углеобогащения; повышение экономической эффективности и энергетической надежности технологических процессов за счет уменьшения потребления импортируемых энергоресурсов, в результате замещения части их объема перспективными видами топлива. Эта концепция не исключает приготовления ВУТ из угля высокого качества, с последующей отправкой к потребителю [7, 8]. Как выгоднее использовать уголь: для коксования, для ТЭЦ или для создания ВУТ, определяет сформировавшаяся рыночная конъюнктура. Поэтому такое технологическое решение существенно зависит от внешних форс-мажорных факторов. Более стабильными и выгодными решениями являются технологии, позволяющие вовлекать в производство дополнительные источники углей, что позволяет экономить покупные энергоносители и снижает затраты на хранение отходов углеобогащения.

Перспективность этого направления подтверждается существующими и прогнозируемыми объемами шламов на предприятиях угольной отрасли Украины, которые могут использоваться как сырье для приготовления ВУТ или в качестве дополнительного источника дешевых энергоносителей (табл. 1). Для этого требуется обоснование рациональных параметров технологии утилизации обводненных отходов углеобогащения путем приготовления ВУТ.

Эффективность распространённого сегодня способа утилизации угольных шламов путем добавки к отгружаемому фабрикой продукту, который используется в качестве штатного топлива, как для мощных пылеугольных энергоблоков крупных электростанций, так и для котлов со слоевым сжиганием, а также котлоагрегатов бытовой и промышленной сферы, не может быть оценена однозначно. При этом увеличиваются зольность и влажность топлива, а, следовательно, снижается его теплотворная способность и увеличиваются потери от механического недожога [9]. Как следствие, стоимость угля, базирующаяся на его энергетическом потенциале, с увеличением зольности снижается, однако при этом ухудшаются теплотехнические и топочные характеристики и увеличивается расход топлива. К тому же, факельное сжигание угольной пыли при зольности топлива более 25 % требует обязательной «подсветки» природным газом или мазутом. Повышенная зольность котельного топлива вызывает необходимость увеличения газомазутной подсветки. Кроме того, существенно возрастают затраты на золоудаление и возмещение экологического ущерба. В ещё большей степени эти недостатки проявляются при использовании угля с повышенной зольностью в топках слоевого сжигания с высоким недожогом и без него и несоответствии экологическим требованиям.

Другой путь использования высокозольных угольных шламов – это их вторичное обогащение и применение концентрата в качестве штатного топлива. В этом плане оптимальной технологией, подтвержденной мировой практикой, является сжигание в топках циркулирующего кипящего слоя (ЦКС). Однако эффективное применение этой технологии возможно только в модифицированных или специально сконструированных котлоагрегатах, при тщательном соблюдении регламентных требований к их эксплуатации. Затраты на модернизацию энергетических котлоагрегатов под технологию ЦКС составляют от 400 до 600 долл. США на 1 кВт установленной мощности, а на сооружение нового котла специальной конструкции – до 1400 долл. США.

Кроме того, высокая (более 85 %) зольность делает проблематичным сжигание в топках ЦКС сухих отходов угольной промышленности, которых в отвалах шахт и обогатительных фабрик накопилось около 3 млрд т. Известные технологии повторного обогащения позволяют извлекать из отходов зольностью менее 75 % до 70 % углерода. Стоимость продукта обогащения зольностью 35 % при аналогичном содержании минеральных включений может составить до 1/3 стоимости антрацитового штыба. Такая технология требует создания соответствующих мощностей, что связано со временем и значительными капиталовложениями, а это откладывает её реализацию на отдалённую перспективу [10].

И, наконец, ещё один вариант использования шламов предполагает приготовление на их основе ВУТ. В виду, что в этом случае отпадает необходимость обезвоживания исходного шлама, гранулометрический состав и крупность которого будут способствовать существенному снижению энергоёмкости измельчения по сравнению с рядовым углем. ВУТ может быть использовано в топках котлов всех типов для полной или частичной замены природного газа как основного или дожигового топлива с целью повышения степени выгорания углерода и снижения выхода оксидов азота.

Одним из основных преимуществ ВУТ является возможность приготовления его на основе не только высококачественного угля, но и высокозольной угольной мелочи, удаление которой в шламонакопители со-

Гірнична електромеханіка

пряжено с ощутимой потерей энергетического потенциала, что при накоплении в больших объёмах создаёт определённую экологическую угрозу. Кроме того, технология приготовления ВУТ даёт возможность вовлечения в область полезного использования промышленных и бытовых отходов, а также сточных вод, засоренных твердыми и жидкими энергоносителями.

Применение высокозольных угольных шламов в качестве исходного продукта для приготовления ВУТ позволяет отказаться от дорогостоящей и экологически небезопасной сушки, устраняет технологи-

Таблица 1

Объемы шламов, складированных на углеобогатительных фабриках Украины

Марка угля	Общий объем, тыс. т / %	Стадия готовности к выемке, тыс. т / %		
		Готовы	Отстаивание	Заполнение
Суммарные				
Ж	24460,0/21,97	3480,0/20,69	0,0/0,00	20980,0/28,20
Г, ГЖО	23710,0/21,30	3300,0/19,62	3890,0/19,32	16520,0/22,21
ДГ	22520,4/20,23	6250,0/37,16	9600,0/47,68	6670,4/8,97
Г, ДГ	17918,0/16,09	593,0/3,53	485,0/2,41	16840,0/22,64
А	9798,7/8,80	1259,5/7,49	2289,4/11,37	6249,8/8,40
ОС, КС	3550,0/3,19	1070,0/6,36	1600,0/7,95	880,0/1,18
Т	3154,0/2,83	257,0/1,53	108,0/0,54	2789,0/3,75
Г	2843,0/2,55	80,0/0,48	1502,0/7,46	1261,0/1,70
К	1786,0/1,60	450,0/2,68	278,0/1,38	1058,0/1,42
Д	1600,0/1,44	80,0/0,48	380,0/1,89	1140,0/1,53
Итого	111340,1/100,00	16819,5/100,00	20132,4/100,00	74388,2/100,00
Балансовые				
А	1721,7/71,67	232,5/47,69	679,4/66,65	809,8/90,46
Г	343,0/14,28	80,0/16,41	202,0/19,82	61,0/6,81
ДГ	313,4/13,05	168,0/34,46	130,0/12,75	15,4/1,72
Т	24,0/1,00	7,0/1,44	8,0/0,78	9,0/1,01
Итого	2402,1/100,00	487,5/100,00	1019,4/100,00	895,2/100,00
Забалансовые с зольностью от 45 до 60 %				
Г, ДГ	12090/33,64	395/4,97	355/6,29	11340/50,76
ДГ	9280/25,82	5150/64,76	4000/70,88	130/0,58
А	5077/14,13	877/11,03	810/14,35	3390/15,17
Ж	4200/11,69	0/0,00	0/0,00	4200/18,80
ГЖО	2800/7,79	0/0,00	0/0,00	2800/12,53
ОС, КС	1450/4,04	1000/12,58	100/1,77	350/1,57
К	828/2,30	450/5,66	278/4,93	100/0,45
Д	210/0,58	80/1,01	100/1,77	30/0,13
Итого	35935/100,00	7952/100,00	5643/100,00	22340/100,00
Забалансовые с зольностью свыше 60 %				
А	3000/4,11	150/1,79	800/5,94	2050/4,01
Ж	20260/27,75	3480/41,53	0/0,00	16780/32,80
ДГ	13225/18,12	1100/13,13	5600/41,57	6525/12,76
Г, ДГ	5530/7,58	30/0,36	0/0,00	5500/10,75
Т	3130/4,29	250/2,98	100/0,74	2780/5,43
ОС, КС	1600/2,19	70/0,84	1500/11,14	30/0,06
ГЖО	4290/5,88	400/4,77	3890/28,88	0/0,00
Г, ГЖО	16620/22,77	2900/34,61	0/0,00	13720/26,82
Г	2500/3,42	0/0,00	1300/9,65	1200/2,35
Д	1390/1,90	0/0,00	280/2,08	1110/2,17
ОС	500/0,68	0/0,00	0/0,00	500/0,98
К	958/1,31	0/0,00	0/0,00	958/1,87
Итого	73003/100,00	8380/100,00	13470/100,00	51153/100,00

ческие проблемы с мокрой угольной мелочью у потребителя, снижает или даже полностью исключает расходы на поддержание (эксплуатацию действующих) шламонакопителей и сооружение новых. Это приносит, таким образом, энергетические и экологические выгоды, а также дополнительные, поскольку оксиды серы, образующиеся при сжигании угля в результате окисления серосодержащих компонентов топлива, достаточно хорошо связываются оксидами щелочноземельных и щелочных металлов (СаО, MgO, Na₂O, K₂O), а также их соединениями, образуя твердые сульфаты, которые выводятся с твердыми очаговыми остатками. Монооксид азота NO и диоксид азота NO₂ образуются во время сжигания топлива в результате окисления азота при высоких температурах и химических реакций азотсодержащих соединений в угле с кислородом воздуха и содержащимися в топливе кислородсодержащими соединениями. Более низкий при сжигании ВУТ коэффициент избытка воздуха (3 – 7 %), восстановление азота монооксидом углерода при температурах 800 – 900 °С (2NO + 2CO ↔ N₂ + 2CO₂), а также гетерогенные реакции с коксовым остатком (NO + коксовый остаток → N₂) в условиях более низких температур (на 100–200 °С) при камерном горении угля приводят к существенному снижению выбросов NO_x, что позволяет говорить о сохранении озонового слоя и о квотах по Киотскому протоколу [10].

Сдерживающим фактором в применении ВУТ является необходимость его транспортировки к потребителю. Большая часть городов Украины давно органично интегрирована в густую железнодорожную сеть, обеспечивающую доставку угольного сырья не только к месту коксования, но и к тепловым станциям восточных регионов страны. Это позволяет обеспечить интенсивный грузопоток энергетических и коксующихся углей для промышленных и коммунальных нужд. Однако задекларированный в государственном документе переход на ВУТ предполагает его транспортирование по трубопроводам, оборудование специальных высоко технологических комплексов по приготовления высококонцентрированной суспензии [3, 4]. Такой подход не исключает применения существующих железнодорожных магистралей как альтернативы строительства трубопроводов значительной протяженности. При выборе любого из указанных видов транспортировки ВУТ обязательным является использование трубопроводов, лотков и насосов. Эти технические средства, если они не используются для транспортирования, но обязательно применяются при погрузочно-разгрузочных операциях или в процессе приготовления суспензии. Известные технологические схемы терминалов приготовления ВУТ ориентированы на использование поршневых насосов, в то время как в схемах водно-шламового хозяйства обогатительных фабрик, а также в гидротранспортных системах для перемещения отходов обогащения от шламонакопителей в основном используются центробежные насосы (грунтовые, шламовые, углесосы), для которых методы расчета параметров при перекачивании ВУТ не разработаны.

Целью статьи является научное обоснование метода расчета параметров центробежных насосов для перекачивания ВУТ.

Заводы-изготовители в паспортах приводят расходно-напорные характеристики (РНХ) этих насосов на воде. Для правильного выбора типа насоса и обеспечения его эксплуатации в рабочем диапазоне подачи требуется пересчет РНХ с воды на гидросмесь с заданными параметрами. При этом обычно пользуются коэффициентами пересчета [1, 11, 12]

$$K_H = \frac{H_C}{H_W}; \quad K_\eta = \frac{\eta_C}{\eta_W}; \quad K_N = \frac{N_C}{N_W}, \quad (1)$$

где K_H – коэффициент пересчета напора; H_C – напор насоса при перекачивании ВУТ; H_W – напор насоса при работе на воде; K_η – коэффициент пересчета коэффициента полезного действия; η_C – КПД насоса при перекачивании ВУТ; η_W – КПД насоса при работе на воде; K_N – коэффициент пересчета мощности; N_C – мощность насоса при перекачивании ВУТ; N_W – мощность насоса при работе на воде.

В общем случае РНХ насоса при работе на ВУТ, а, следовательно, коэффициенты их пересчета зависят в основном от физико-механических свойств твердых частиц (включая плотность и форму), их гранулометрического состава и концентрации гидросмеси. Степень этого влияния зависит от размеров проточной части насоса, частоты вращения рабочего колеса и режима работы. В связи с таким многообразием факторов, влияющих на коэффициенты пересчета, теоретически их определить затруднительно. Наиболее достоверные данные по пересчету РНХ насосов обычно получают экспериментальным путем [1, 5, 11, 12]. Также исследования были проведены в АОЗТ НПО «Хаймек» на стендовой установке с углесосом У900-90. В качестве привода использовался двигатель постоянного тока с регулируемой частотой вращения. Исследования проводились при частотах вращения 1000 и 750 об/мин. В процессе эксперимента периодически отбиралась проба суспензии на выходе из напорного трубопровода. Среднее значение плотности суспензии составляло 1174 кг/м³, массовая концентрация угля в ней – 46,7 %, средневзвешенная крупность частиц 0,092 мм [2]. Суспензия обладала четко выраженными вязкопластическими свойствами.

Как показывают результаты исследований, коэффициенты пересчета связаны между собой соотношениями

$$K_{\eta} = K_H^2; \quad K_N = \frac{\rho}{K_H}. \quad (2)$$

При этом для расчета K_H могут быть использованы формулы (табл.2), апробированные для случая работы насоса на суспензиях низкой концентрации [12 – 16].

Таблица 2

Формулы для расчета коэффициента пересчета напора центробежного насоса при перекачивании ВУТ

Ученые, которые предложили формулы	Формула для расчета K_H	Величина k	Источник
Н.П. Зелепукин, Л.М. Раввинский, А.И. Харин	$K_H = k\rho$	0,8092	[8]
Л.С. Животовский	$K_H = 1 - k(\rho - 1)$	0,3377	[9]
Н.Д. Холин, Г.П. Никонов, С.О. Славутский	$K_H = \rho - k \frac{\rho_T}{\rho_T - 1} (\rho - 1)$	0,4087	[6]
А.Е. Смолдырев	$K_H = [1 - k(\rho - 1)]^{0.85}$	0,3369	[5]
Специалисты ИГТМ НАН Украины	$K_H = \frac{1 + (\rho - 1)k}{\rho}$	0,6623	[7]

Характерной особенностью работы центробежного насоса на ВУТ является то, что при запуске его на малой частоте вращения (150 – 200 об/мин) суспензия в трубопроводе не приходит в движение. Ее движение начинается лишь при достижении в трубопроводе давления, достаточного для преодоления напряжения начального сдвига, величина которого зависит от времени нахождения суспензии в покое [3, 4]. Следует отметить, что при частоте вращения 1000 об/мин и номинальной подаче $Q_{ном} = 620 \text{ м}^3/\text{ч}$ напор центробежного насоса на водоугольной суспензии составлял 37 м столба перекачиваемой суспензии, а КПД – 65 %, что соответственно на 2 м и 5 % меньше, чем на воде. При переходе с воды на суспензию на частоте вращения 750 об/мин и номинальной подаче 465 $\text{м}^3/\text{ч}$ напор центробежного насоса снизился с 22,5 до 21,5 м, а КПД – с 68,5 до 62,5 %. Для исследованных частот вращения установлено, что коэффициент пересчета напора $K_H = 0,95$ практически постоянен в интервале рабочих подач (0,6–1,1) $Q_{ном}$ и не зависит от частоты вращения рабочего колеса насоса. Коэффициенты пересчета КПД составляют: $K_{\eta} = 0,93$ при $n = 1000$ об/мин и $K_{\eta} = 0,91$ при $n = 750$ об/мин. Значения K_{η} в диапазоне рабочих подач также практически постоянны.

Результаты кавитационных испытаний центробежного насоса на ВУТ при частоте вращения $n = 1000$ об/мин и подачах 500 и 247 $\text{м}^3/\text{ч}$ [3] показывают, что начало кавитационных явлений характеризуется снижением напора на частной кавитационной характеристике. Величине критического кавитационного запаса $\Delta h_{кр}$, при которой напор угленасоса снижается на 3 %, в соответствии с ГОСТ 6134-87 «Насосы динамические. Методы испытаний», соответствуют значения допустимого кавитационного запаса центробежного насоса на суспензии: при $Q = 500 \text{ м}^3/\text{ч}$ $\Delta h_{дс} = 5,4$ м; при $Q = 247 \text{ м}^3/\text{ч}$ $\Delta h_{дс} = 3,3$ м. Из кавитационных характеристик $\Delta h_{д} = f(Q)$ видно, что допустимый кавитационный запас центробежного насоса, измеряемый в метрах столба перекачиваемой среды, на суспензии выше, а, следовательно, всасывающая способность ниже, чем на воде. Результаты экспериментальных исследований подтверждают, что для пересчета величины допустимого кавитационного запаса при перекачивании ВУТ необходимо использовать принципиально иную формулу, аналогичную случаю работы насоса на суспензиях низкой концентрации [12 – 16]:

$$\Delta h_C = \rho \Delta h_W + 10(\rho - 1), \quad (3)$$

где Δh_C – допустимый кавитационный запас при перекачивании ВУТ; Δh_W – допустимый кавитацион-

ный запас при работе на воде; ρ – относительная плотность ВУТ.

Полученные данные свидетельствуют, что при перекачивании ВУТ не наблюдается существенного изменения напорных и энергетических характеристик центробежных насосов по сравнению с характеристиками на воде. Это обстоятельство в сочетании с низкой удельной материалоемкостью центробежных насосов (в 6 – 8 раз ниже, чем у поршневых) говорит о целесообразности их использования в рассматриваемых технологических схемах.

Список литературы

- 1 Смолдырев, А.Е. Трубопроводный транспорт концентрированных гидросмесей / А.Е. Смолдырев, Ю.К. Сафонов. – М.: Машиностроение, 1989. – 256 с.
- 2 Киричко, С.Н. Расчет параметров гидротранспорта высококонцентрированных гидросмесей при разработке техногенных месторождений / С.Н. Киричко, Е.В. Семенов // Социально-экономические и экологические проблемы горной промышленности, строительства и энергетики: материалы 8-й междунар. конф.- Тула – Донецк – Минск, 2012. – Т. 1. – С. 199 – 206.
- 3 Круть, О.А. Водовугільне паливо / О.А. Круть. – К.: Наук. думка, 2002. – 172 с.
- 4 Світлий, Ю.Г. Гідравлічний транспорт / Ю.Г. Світлий, В.С. Білецький. – Донецьк: Східний видавничий дім, 2009. – 436 с.
- 5 Островерхов, В. Влияние поверхностно-активных веществ и других факторов на получение высококонцентрированных водоугольных суспензий с низкой вязкостью / В. Островерхов. – М: Углетехиздат, 1973. – 154 с.
- 6 Урьев, Н.Б. Влияние высокоскоростной активации водоугольных суспензий на их структурно-реологические свойства / Н.Б. Урьев, Э.И. Рукин // Исследование технологии и оборудования терминальных комплексов магистрального гидротранспорта: сб. науч. тр. / НПО Гидротрубопровод. – М., 1985. – С. 19 – 24.
- 7 Круть, А.А. Водоугольное топливо на основе угольных шламов / А.А. Круть, Л.Н. Козыряцкий // Гірнична електромеханіка: зб. наук. праць / ДНТУ. – 2009. – Вип. 17 (157). – С. 185 – 194.
- 8 Дунаевская, Н.И. Отходы угля. Обзор ресурсов и возможности использования / Н.И. Дунаевская, А.И. Росколуца, Н.В. Чернявский // Member State Technologies dedicated to Help the Energy Self Sufficiency Process optimising the local Resources such as Coal: materials of The Seminar. –К., 1997. – Р. 9.
- 9 Высококонцентрированные водоугольные суспензии – новый вид композиционного экологически чистого жидкого топлива / Е.В. Титов, С.Л. Хилько, Ю.Г. Світлий [и др.] // Технологічні дослідження: стан і перспективи: зб. наук. праць міжнарод. наук.-практ. конф. – Івано-Франківськ, 1995. – С. 125 – 127.
- 10 Лучников, В. Состояние энергетики Украины, возможности для инвесторов по реабилитации тепловых электростанций / В. Лучников // Деловые возможности и потребность в инвестициях. Возможности модернизации украинских угольных электростанций: материалы украинско-американской объединённой конф. – К., 1988. – С. 121 – 125.
- 11 Обоснование параметров и режимов работы гидротранспортных систем горных предприятий / Ю.Д. Баранов, Б.А. Блюсс, Е.В. Семенов, В.Д. Шурыгин. – Д. : Новая идеология, 2006. – 416 с.
- 12 Нурок, Г.А. Процессы и технологии гидромеханизации открытых горных работ / Г.А. Нурок. – М.: Недра, 1979. – 549 с.
- 13 Семенов, Е.В. Научные основы технологий гидромеханизации открытой разработки титан-цирконовых россыпей / Е.В. Семенов. – К.: Наукова думка, 2011. – 231 с.
- 14 Зелепукин, Н.П. Справочник гидромеханизатора / Н.П. Зелепукин, Л.М. Раввинский, А.И. Харин. – К.: Буівельник, 1969. – 226 с.
- 15 Животовский, Л.С. Техническая механика гидросмесей и грунтовые насосы / Л.С. Животовский, Л.А. Смйловская. – М.: Машиностроение, 1986. – 224 с.
- 16 Смолдырев, А.Е. Трубопроводный транспорт / А.Е. Смолдырев. – М.: Недра, 1980. – 390 с.

Рекомендовано до друку д-ром техн. наук Блюссом Б.А.