УДК 669.046.582.5

О РАСЧЁТЕ ВЯЗКОСТИ РАСПЛАВА ШЛАКА И ИСПОЛЬЗОВАНИИ ДАННЫХ ДЛЯ АНАЛИЗА РАБОТЫ ПЫЛЕУГОЛЬНЫХ КОТЛОВ

Алехнович А.Н., Артемьева Н.В., Богомолов В.В.

Инженерный Центр Энергетики Урала, филиал УралВТИ
Уральская теплотехническая лаборатория, Челябинск, Россия

АННОТАЦИЯ

Выполнена проверка применимости методов Watt&Fereday и Калмановича – Франка, которые для банка данных по вязкости широкого круга углей показали меньшую из анализировавшихся методов погрешность, применительно к донецким углям. Предложены и рекомендуются для использования при анализе донецких углей модифицированные методы расчёта на базе этих методов.

На примере котла ТПП-312 при сжигании донецких углей марки Г демонстрируются возможности компьютерной программы LisA по прогнозированию применимости углей и маневренности котлов по условиям жидкого шлакоудаления.

Анализируется применение данных о вязкости в моделях шлакования котлов.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время на многих ТЭС России по разным причинам, часто не техническим, внедряется сжигание непроектного угля. В работах УралВТИ экспериментам по опытному сжиганию непроектных углей на котлах предшествуют дополнительные исследования характеристик и свойств интересующих углей и аналитические проработки возможностей и последствий такой замены. В том числе, это касается условий вытекания расплава шлака для топок с жидким шлакоудалением (ЖШУ) и шлакования котлов разных типов.

Топки с жидким шлакоудалением не сооружаются в течение длительного времени, однако в силу медленного обновления оборудования большое количество таких топочных устройств, преимущественно для низкореакционных углей, находится в эксплуатации. Для высокореакционных газовых и бурых углей, где внедрение топок с ЖШУ в своё время связывалось с проблемами шлакования, значительная часть котлов реконструирована на гранулированное (твёрдое) шлакоудаление.

Работоспособность топок с ЖШУ, в конечном счёте, определяется возможностью обеспечить бесперебойную эвакуацию шлакового расплава, и для анализа жидкого шлакоудаления необходимы сведения о зависимости вязкость – температура расплава $\eta = f(t)$ или, в первом приближении, о температуре надёжного жидкого шлакоудаления $t_{нж}$.

Сейчас в российских институтах и наладочных организациях, традиционно работающих на энергетику, экспериментальные исследования вязкости не выполняются, и реально можно использовать только расчётные методы оценки вязкости в зависимости от химического состава шлака. За рубежом интерес и продолжающееся совершенствование расчётных методов оценки вязкости связано в первую очередь с разработкой математических моделей шлакования, в которых условия закрепления индивидуальных частичек летучей золы определяются по их вязкости, а также внедрением новых технологий с газификацией топлива и удалением шлака в виде расплава.

РАСЧЁТ ВЯЗКОСТИ ШЛАКОВЫХ РАСПЛАВОВ

Зависимость вязкости от температуры и значение вязкости при фиксированной температуре в определяющей мере зависят от химического состава шлака, и, начиная с 30х годов прошлого века в разных отраслях разработано большое количество методов расчёта вязкости алюмо-силикатных расплавов от их состава. Силикатные и алюмо-силикатные расплавы представляют собой полиэлектролиты (разнообразные катионы и кремне(-алюмо-) кислородные полианионы) со сложной гетерогенной структурой, и имеют, так называемое квазикристаллическое строение. Сложность создания расчётных методов, справедливых для разнообразных составов,

© Алехнович А.Н., Артемьева Н.В., Богомолов В.В.

связана, в том числе с многокомпонентностью химического состава, изменением свойств и связей преимущественно амфотерных элементов (Fe, Al) и полианионов в зависимости от соотношения комплексообразующих элементов (Si) и элементов модификаторов сетки (Ca, Mg, K, Na).

Для расчёта вязкости расплава шлака используются эмпирические методы (установление корреляционных связей для анализируемой совокупности данных) и полуэмпирические модели, базирующиеся на теоретических моделях вязкого течения, строения расплава и эмпирических коэффициентах. Для повышения точности прогнозирования вязкости, наряду с совершенствованием расчётных моделей, используется разделение алюмосиликатных материалов на несколько групп и применение различающихся зависимостей для каждой из групп, например [1]. В том числе, применительно к энергетическим углям могут использоваться отличающиеся зависимости для углей разных месторождений и с золой разного состава, например [2].

В Уральской теплотехнической лаборатории создан банк данных “температура-вязкость-состав” для золо-шлаковых материалов энергетических углей преимущественно бывшего Союза, и выполнен анализ погрешности прогнозирования по широкому кругу разнообразных методов применительно к этому банку данных. Проведённый расчётный анализ отличается от литературных аналогов использованием наряду с оригиналами методов их модификаций. При модификации регрессионным анализом определены новые эмпирические коэффициенты расчётных формул применительно к использованному банку данных.

Алгоритмы методов, показавших лучшие результаты применительно к анализировавшемуся банку данных вне зависимости от времени их разработки, а также интересных по концепции или опубликованных в последнее время приведены в [3]. Ссылки на ряд других анализировавшихся методов даны в [4]. Наилучшие результаты из широко используемых методов получены при расчёте по методу Watt&Fereday [5] и по модели Урбана, метод Калмановича – Франка [6]. Выполненная позже оценка погрешности методов, в том числе [1], не вошедших в исходный анализ, не изменили заключения о приоритетности указанных методов. В [7] приведена информация о разработанном в Уральской лаборатории эмпирии-ческом методе и компьютерной программе *VisA-2004*, в которых корреляционные зависимости от трёх и/или пяти переменных выводятся в рамках математической программы метода. Коэффициенты уравнений (полиномов 3-й степени) не фиксируются и зависят от используемого банка данных. Прогнозирование по этому методу для анализировавшегося банка данных обеспечивает точность на уровне экспериментальной погрешности.

С учётом лучших результатов из доступных методов прогнозирования, в подготовленном для данного сообщения анализе вязкости золо-шлаковых расплавов донецких углей, мы ограничились методами Watt&Fereday и Калмановича – Франка.

Для анализа создан банк данных (96 проб) по донецким углям с характерным кислым составом золы

$$ko = (SiO_2+Al_2O_3+TiO_2)/$$

$$/(CaO+MgO+K_2O+Na_2O)>2,5.$$

Распределение анализировавшихся проб по значению температур t_{20} и t_{10}, при которых вязкость расплава составляет η=20 Па·с (200 пуазов) и η=10

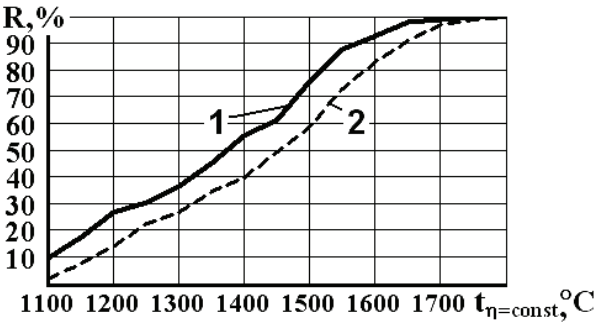

Рис.1. Доля проб, имеющих значение температуры t_{20} (1) и t_{10} (2) меньше приведённого на оси абсцисс.

Па·с показано на рис.1.

В отличие от полного банка данных (в итоге 765 проб), в котором по различным признакам, включая простую математическую отбраковку “промахов”, часть проб из анализа исключена, в банке данных по донецким углям из-за статистически небольшого количества проб и отсутствия признанной процедуры отбраковки для многокомпонентных систем использованы все имеющиеся данные. При таком подходе ухудшаются статистические показатели, но в качественном отношении результаты сравнительного анализа не изменяются. Здесь уместно отметить ненадёжность экспериментальных данных по вязкости шлаков. Помимо признанной низкой точности методов измерений (при характерной вязкости погрешность по температуре составляет порядка ±50°C), экспериментальные значения при одинаковом составе могут кардинально различаться. Это в основном связано с проведением исследований фактически гетерогенных систем, содержащих твёрдую фазу, особенно для легко кристаллизующихся и тугоплавких шлаков, а не гомогенной жидкости, а также различием в степени окисленности железа. Трёхвалентное железо

является комплексообразователем, увеличивает вязкость расплава; двухвалентное железо – модификатор сетки, понижающее вязкость. Отметим также, что погрешность справочных экспериментальных данных дополнительно связана с несоответствием усреднённого, например, по угледобывающему предприятию, состава и состава конкретных единичных исследованных проб.

Суть метода расчёта зависимости вязкость - температура по модели Урбана (вариант Калмановича-Франка) состоит в замене многокомпонентного состава золо-шлакового материала трёхкомпонентным в мольных долях по массе:

- X_K = SiO_2 – комплексообразователь,
- X_{AM} = Al_2O_3 - амфотерный компонент
- X_M = $CaO+MgO+K_2O+Na_2O+FeO$ (железо в двухвалентной форме)

Это компоненты модификаторы сетки. По

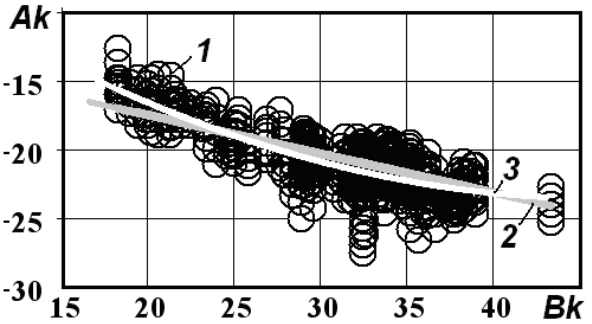

Рис.2. Соотношение показателей *Bk* и *Ak* 1 – экспериментальные значения, 2, 3 – соотношения по (1) и (1д)

сведениям о X_K и $\alpha = X_M / (X_M + X_{AM})$ рассчитывается показатель *Bk*, далее показатель *Ak* как линейная зависимость от *Bk* и вязкость по уравнению Веймана:

$$\ln(\eta) = Ak + \ln T + (1000 \cdot Bk / T),$$

где вязкость в пуазах и температура в градусах Кельвина. Полный алгоритм и расчетные формулы метода, помимо оригинала [6] и публикации [3], доступны на сайте [8] и здесь из-за громоздкости не воспроизводятся.

Приведём лишь формулу связи показателей *Bk* и *Ak.* В оригинале она имеет вид:

$$Ak = -(0{,}2812 \cdot Bk + 11{,}8279), \qquad (1)$$

и применительно к совокупности отечественных экспериментальных данных [3]:

$$Ak = -(0{,}328 \cdot Bk + 10{,}12). \qquad (1п)$$

Для банка данных по донецким углям в диапазоне вязкости η= 5-80 Па·с по результатам регрессионного анализа предлагается следующая нелинейная зависимость:

$$Ak = 0{,}00441 - 1{,}0664 \cdot Bk + 0{,}0123 \cdot Bk^2. \qquad (1д)$$

Графически зависимости (1) и (1д) показаны на рис.2.

По разработанному достаточно давно британскими исследователями методу Watt&Fereday [4] зависимость вязкость – температура рассчитываются как:

$$\log(\eta) = cw + 10^7 \cdot mw/(t-150)^2,$$

где t - текущая температура в °С, η- вязкость в пуазах; "*mw*" и "*cw*" – эмпирические коэффициенты, определяемые в зависимости от состава как:

$$mw = 0{,}00835 \cdot Si_w + 0{,}00601 \cdot Al_w - 0{,}109 \qquad (2.а)$$

$$cw = 0{,}0415 \cdot Si_w + 0{,}0192 \cdot Al_w + 0{,}0276 \cdot Fe_w^{общ} + 0{,}016 \cdot Ca_w - 3{,}92. \qquad (2.б)$$

Состав пробы в масс.% оксидов ересчитывается по условию:

$$Si_w + Al_w + Fe_w^{общ} + Ca_w + Mg_w = 100, \text{ масс } \%.$$

При сохранении идеи и алгоритма метода применительно к банку данных по донецким углям в диапазоне вязкости η= 5-80 Па·с получены следующие зависимости расчёта коэффициентов *mw* и *cw*:

$$mw = 0{,}004789 \cdot Si_w - 0{,}002293 \cdot Al_w + 0{,}119. \qquad (2.а)$$

$$cw = 0{,}017 \cdot Si_w + 0{,}04 \cdot Al_w + 0{,}008582 \cdot Fe_w^{общ} + 0{,}012 \cdot Ca_w - 1{,}8. \qquad (2.б)$$

Результаты сравнения результатов расчёта с экспериментальными данными приведены в табл. 1.

метод расчёта	$\Delta t_{ср}$, °С	S_{t20},°С	$S_{ср}$,°С
МодельУрбана (вариант Калмановича-Франка)			
по оригиналу	-23,4	71,1	75,3
с модификацией	3,2	59,1	64,5
Метод Watt&Fereday			
по оригиналу	5,2	80,9	85,6
с модификацией		65,4	82,1

Табл.1. Сравнение расчётных и экспериментальных данных по температуре при η=const

Здесь, $\Delta t_{ср} = \Sigma\Sigma(t^{экс} - t^{расч})/N \cdot 5$ среднее отклонение при количестве проб N при $5^{ти}$ анализировавшихся значениях вязкости η= 5, 10, 20, 40 и 80 Па·с; среднеквадратическое отклонение $S_{ср} = \Sigma\Sigma \left| t^{экс} - t^{расч} \right| / N \cdot 5$ и среднеквадратическое отклонение для значений температуры t20:

$$S_{t20} = \Sigma\Sigma \left| t_{20}^{экс} - t_{20}^{расч} \right| / N.$$

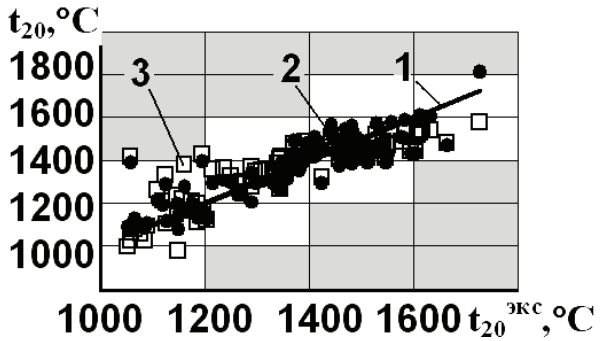

Рис.3. Сравнение экспериментальных и расчётных значений температуры при вязкости расплава 20 Па·с.

Графически сравнение экспериментальных и расчётных значений вязкости по температуре t_{20} показано на рис.3.

Здесь: 1 – экспериментальные значения, 2 – расчёт по модифицированному методу Калмановича-Франка, 3 – то же по модифицированному методу Watt&Fereday.

По результатам приведённого анализа и с учётом того, что анализ выполнен для банка данных без отбраковки экспериментальных “промахов”, можно признать приемлемость рассмотренных методов и рекомендовать их для расчёта вязкости расплавов шлаков донецких углей.

ОЦЕНКА ПРИМЕНИМОСТИ УГЛЕЙ ПО УСЛОВИЯМ ЖИДКОГО ШЛАКОУДАЛЕНИЯ

Широко принято проводить сравнение углей по условиям пригодности для жидкого шлакоудаления по значению так называемой температуры начала надёжного жидкого шлакоудаления $t_{нж}$. Для слабо кристаллизующихся шлаков, к числу которых относятся и рассматриваемые донецкие угли с кислым составом минеральной части, в качестве $t_{нж}$ в нашей стране принимается температура при вязкости η= 20 Па·с (200 пуазов) t_{20}, за рубежом – при вязкости η= 25 Па·с (250 пуазов) t_{250}. Следует отметить, что для подобных шлаков условия $\eta_{нж}$, $t_{нж}$ не имеют строгого физического смысла. Они зависит от характеристик шлака (для тугоплавких шлаков значение вязкости недопустимого ухудшения эвакуации расплава ниже) и в большей мере от совершенства конструкции лётки и узла шлакоудаления. Обычно значения $\eta_{нж}$<20 Па·с и для котлов с неплотным узлом шлакоудаления составляют $\eta_{нж}$=8-10 Па·с. Для донецких углей разница температур t_{20}- t_{10} и, следовательно, необходимых температур факела в районе лётки в среднем составляет 80°С, и доля пригодных для ЖШУ углей изменяется примерно на 10% (рис.1).

Очевидно, что возможность обеспечить жидкое шлакоудаление зависит не только от температуры шлака, но и от большого количества факторов, определяющих температуру факела, и условие жидкого шлакоудаления при номинальной нагрузке может быть представлено как:

$$\vartheta^{л} > t_{нж}+\Delta\vartheta_{ф_шл}+\Delta\vartheta_{нагр}, °C$$

где $\vartheta^{л}$ – температура факела в районе лётки, $\Delta\vartheta_{ф_шл}$- разность температур факела и шлака, $\Delta\vartheta_{нагр}$- изменение температуры факела в диапазоне от номинальной до минимальной по условиям шлакоудаления нагрузки.

Для прогнозирования маневренности котла по условиям жидкого шлакоудаления разработана компьютерная программа *LiSA*, в которой реализован полуэмпирический метод УралВТИ - Уральской теплотехнической лаборатории.

Программа позволяет оценивать применимость и маневренность топок с ЖШУ от большого числа определяющих процесс факторов, в том числе: состава минеральной и характеристик органической части топлива, количества балласта, разнообразных особенностей конструкции котла и режима его работы.

В программе рассчитывается зависимость вязкость - температура с учётом перераспределения минеральной части между шлаком и уносом; минимальная по условиям обеспечения жидкого шлакоудаления температура факела в районе лётки ϑ^{min}; теплообмен в зоне горения, в том числе через текущую плёнку шлака. По тепловому балансу зоны горения определяется относительная минимальная по условиям шлакоудаления нагрузка

$$M= (BQ_p^p)^{min} / (BQ_p^p)^{ном}.$$

При M>1,0 жидкое шлакоудаление для анализируемых условий не обеспечивается при всех нагрузках.

Для данного сообщения в качестве примера выполнен расчёт маневренности котла ТПП-312 при сжигании донецкого угля Г и отходов его обогащения. Некоторые заданные характеристики угля и результаты расчёта трёх вариантов приведены в таблице 2. По результатам расчёта видно, что при сжигании ГСШ не обеспечивается желательная (M=0,7) маневренность котла. Пример представления результатов расчёта вязкости в программе LiSA и дополнительный анализ полученных результатов показан на рис.4.

Приведённый пример дополнительно иллюстрирует недостаточность информации только об условиях начала надёжного шлакоудаления $t_{нж}$ для оценки применимости “новых” или с отличающимися от проектных характеристиками углей.

	Значения для вариантов расчёта		
	1	2	3
	ГР	Г п/п	ГСШ
A^d, %	29,6	40,5	33,3
Q_i^r, ккал/кг	4870	3810	3980
t_{20},°C	1500	1480	1530
ϑ^{min},°C	1575	1545	1600
M	0,59	0,68	0,8

Табл.2. Пример результатов расчёта маневренности котла ТПП-312 по условиям шлакоудаления по программе LiSA

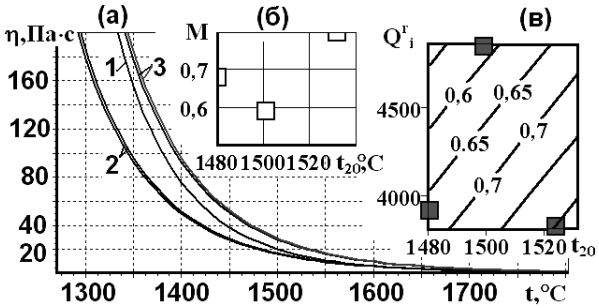

Рис.4. Пример представления результатов расчёта вязкости золо- шлаковых материалов (а), расчётная зависимость маневренности котла ТПП-312 от температуры t_{20} (б) и от значений t_{20}°C и теплоты сгорания Q_i^r,ккал/кг (в). 1, 2, 3 – угли по таблице 2.

Отметим, однако, что при любом уровне совершенства полуэмпирические методы типа LiSA имеют лишь качественный оценочный характер из-за того, что условия удаления расплава через лётку в значительной мере зависят от локальных факторов, в частности от профиля локальных температур в зоне горения. Для использования её для количественного анализа могут вводиться эмпирические поправки или “скрытые эмпирические коэффициенты” по результатам исследований конкретного оборудования при сжигании традиционного угля.

В настоящее время в практике создания и наладки топочных камер всё больше используются компьютерные модели топочного процесса, например отечественная “SigmaFlame” [9] или международная коммерческая система Fluent, которые, в том числе, позволяют рассчитывать поля температур, тепловых потоков, концентраций в зоне горения над подом. Отсутствие такой программы, адаптированной для анализа жидкого шлакоудаления, при ясных концептуальных положениях и имеющемся большом экспериментальном материале связано только с её не востребованностью.

ПРИМЕНЕНИЕ ВЯЗКОСТИ ШЛАКОВЫХ РАСПЛАВОВ ДЛЯ АНАЛИЗА ШЛАКОВАНИЯ

В методе Babcock & Wilcox [10] для оценки шлакующих свойств углей используется соотношение экспериментальных значений вязкости в восстановительной (t_{10000}) и окислительной (t_{250}) атмосфере. Расчётных методов определения необходимых значений вязкости при указанных условиях нет. Имеются разработки по оценке температуры начала шлакования $t_{шл}$ по вязкости переохлаждённого расплава, точнее по температуре при определённой вязкости $t_{\eta=const}$.

Однако наши исследования показали неудовлетворительную корреляцию температур $t_{\eta=const}$ и $t_{шл}$. Это связано с различием среднего состава золы и золы, формирующей отложения при температурах близких к температуре $t_{шл}$, и неодинаковой ролью разных компонентов в процессе шлакования и в гомогенном расплаве. Проще и точнее значения температуры начала шлакования $t_{шл}$, и допустимой по условиям шлакования температуры газов на выходе из топки $\vartheta''_т$ могут быть оценены непосредственно по химическому составу золы. Например, для углей с кислым составом золы исследованиями различных организаций подтверждена предложенная нами зависимость $t_{шл}$=945+8,22·ko,°C где ko – отношение кислотных и основных оксидов, как приведено выше.

Переход от эмпирических корреляций к научно более обоснованным математическим моделям процесса шлакования связывается с определением химического состава индивидуальных минеральных включений в угле и частиц летучей золы (например по технологии электронной микроскопии CCSEM), расчётом вязкости индивидуальных частиц и условий их закрепления (налипания). По результатам изучения условий налипания на разнообразных стендах и температуры начала шлакования в промышленных условиях нами обосновано условие закрепления частиц летучей золы на поверхностях и в отложениях. По предложенной схеме [11] закрепление частиц происходит при условии, что обобщающая вязкость частицы $\eta_{част}$ и поверхности отложений $\eta_п$ не превышает определённого суммарного значения η_Σ, и это значение равно вязкости начала налипания в адиабатических условиях η_a (равная температура частицы и поверхности). Суммарное значение вязкости частицы и поверхности, в частности, определяется как:

$$\ln(\eta_{\Sigma}) = 2/\{[1/\ln(\eta_{част})]+[1/\ln(\eta_{п})]\}$$

Графически граница налипания по предлагаемому методу показана на рис.5.

Тёмный и светлый участки рисунка соответствуют зонам налипания и отскока частиц; линия 1 – граничная линия налипания частиц по предлагаемой схеме.

Из рисунка видно, что закрепление частиц при равенстве температуры частиц и поверхности происходит при вязкости порядка 10^5 Па·с. При вязкости поверхности или частиц 10^3 Па·с они обладают матричными свойствами, то есть к ним прилипают частицы заведомо не обладающие липкими свойствами.

Рис.5. Графическое представление условий закрепления частичек летучей золы в отложениях по механизму налипания.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Создан банк данных по вязкости золо-шлаковых материалов донецких углей. С учётом минимальной погрешности расчётных методов Watt & Fereday и Калмановича - Франка для широкого круга углей, выполнен анализ и разработаны модификации этих методов для донецких углей.

Рассмотрена недостаточность информации только о температуре начала надёжного шлакоудаления $t_{нж}$ для оценки применимости углей с отличающимися характеристиками. Показана возможность анализировать влияние широкого круга факторов по топливу и котлу на применимость углей и маневренности котлов с жидким шлакоудалением.

Приведена информация об оригинальной модели закрепления золовых частиц в отложениях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Персиков А.С. Вязкость магматических расплавов. М., ”Наука”, 1984 г.
2. Advanced Analytical Characterization of Coal Ashes – An Idemitsu – Kosan – Elsam Cooperation Project/ O.H. Larsen, F.J. Frandsen, L.A. Hansen et al// В кн.: “Impact of mineral impurities in solid fuel combustion”.- New York: Kluwer academic/Plenum Publishers, 1999.- с. 133-145.
3. Алехнович А.Н. Анализ методов расчёта вязкости расплава по сведениям о его химическом составе применительно к отечественному банку данных по углям с кислым составом золы// В кн.: Минеральная часть топлива, шлакование, загрязнение и очистка котлов: Сборник докладов IV^{й} научно-практической конференции.-т.II- ЧФПЭИпк.- 2007 г, с. 71-82.
4. Алехнович А.Н. Расчёт вязкости шлаковых расплавов и его использование для анализа применимости непроектных углей. Теплоэнергетика, 2003, №12.
5. Watt J.D., Fereday F. The flow properties of slag formed from the ashes of British coals: Part 1. Viscosity of homogeneous liquid slags in relation to slag composition// Journal of the Institute of Fuel.- 1969.- v. XLII.- № 338. -pp. 99-103.
6. Kalmanovitch D.P., Frank M. An effective model of viscosity for ash deposition phenomena.// Proc. Conf. on Mineral Matter and Ash Deposition from Coal. - 1988., p.89 - 101.
7. Алехнович А.Н., Расчётный анализ маневренности котлов по условиям жидкого шлакоудаления// Электрические станции, 2005, №6, с.16-21
8. http://www.chipk.ru/conf4/k07viscosity.pdf Анализ погрешности зарубежных методов расчёта вязкости расплава по сведениям о его химическом составе применительно к отечественному банку данных по углям с кислым составом золы.
9. Расчетное исследование вариантов организации процесса сжигания угля в котлах Березовской ГРЭС-1/ Е.С.Тэпфер, А.А.Дектерев, А.А.Гаврилов, В.В.Васильев// В кн.: Горение твердого топлива. Сборник докладов VII Всероссийской конференции. - Новосибирск, 2009 – Часть 1 - с. 215-220.
10. Steam/ its generation and use. The Babcock & Wilcox Company. 41st edition, 2005.
11. Алехнович А.Н. Уточнение расчётной схемы закрепления частиц и роста шлаковых отложений// Теплоэнергетика, 2008, №9