

УДК 621.311.22:622.7.002.68:662.654

В.И. Мурко, Г.Д. Вахрушева, В.И. Федяев, В.И. Карпенко,  
В.П. Мастихина, Д.А. ДзюбаИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ НА РЕОЛОГИЧЕСКИЕ  
ХАРАКТЕРИСТИКИ СУСПЕНЗИОННОГО УГОЛЬНОГО ТОПЛИВАВведение<sup>\*</sup>

Для водоугольного топлива важнейшими характеристиками, определяющими его свойства как жидкого топлива, являются реологические параметры и показатели стабильности. Реология выясняет закон, которому подчиняется жидкость при действии на нее деформирующего усилия, а реологические параметры – это коэффициенты, входящие в аналитическую форму закона деформации. В зависимости от значений реологических параметров водоугольные суспензии проявляют как свойства ньютоновских, так и свойства неньютоновских жидкостей [1].

Значение реологических характеристик угольных суспензий дает возможность прогнозировать и регулировать технологические свойства ВУТ, необходимые для хранения, транспортирования и его успешного сжигания в топках.

Хорошо известно, что температура оказывает значительное влияние на реологические характеристики жидкостей. Поведение ньютоновских жидкостей при течении зависит от единственной характеристики – вязкости, которая является только функцией температуры. Предложено большое количество теоретических и экспериментальных уравнений, описывающих температурные зависимости вязкости. Наиболее употребительно уравнение Аррениуса [2]:

$$\mu = Aa^{-E/RT}, \quad (1)$$

где  $R$  – газовая постоянная,

$E$  – энергия активации вязкого течения,

$A$  – коэффициент, зависящий от природы жидкости.

## Экспериментальная часть

Реологические характеристики ВУТ являются основным показателем, характеризующим их технологическую пригодность. Они определяются физико-химическими процессами, происходящими между твердой и жидкой фазами системы и, следовательно, должны рассматриваться применительно к конкретным условиям их использования.

Получение водоугольной суспензии, необходимой для исследований, производилось методом мокрого перемешивания в смесителе принудительного действия. Количество воды, угля и реагента-пластификатора, подаваемое в смеситель, определялось расчетным путем по массе сухого угля, таким образом, чтобы массовая доля твердой фазы ВУТ соответствовала заданному значению.

Продолжительность перемешивания определялась достижением однородной консистенции суспензии (отсутствием комочков, водоотделения и осадка). Для исследования в качестве твердой фазы ВУТ использовали тонкодисперсные угле-содержащие отходы (фильтр-кеки), полученные от переработки углей различных стадий метаморфизма (марки угля) и зольностей Кузнецкого угольного бассейна:

«КО+К» – ОФ «Северная (г. Березовский);  
«ГЖ» – ЦОФ «Абашевская» (г. Новокузнецк);  
«Г» – ОФ «Щедрухинская» (г. Новокузнецк);  
«КС», – ОФ «Междуреченская» (г. Междуреченск);  
«Т» – ОФ «Междуреченская» (г. Междуреченск);  
«КЖ+Ж» – ЦОФ «Кузбасская» (г. Междуреченск);  
«Т» – ОФ «Красногорская» (г. Междуреченск);  
«Г» – ОФ «Спутник» (г. Полысаево).

В ходе проведения эксперимента определялись реологические характеристики приготовленных в смесителе угольных суспензий их зольность, содержание твердой фазы и гранулометрический состав.

Контроль содержания твердой фазы ВУТ осуществлялся до и после измерений реологических параметров, путем отбора представительных проб и их высушивания при температуре 105 °С по ГОСТ 27314. Фиксировалось изменение концентрации угля в ВУТ за счет испарения воды в процессе проведения эксперимента.

Гранулометрическое распределение частиц угля в ВУТ определялось по ГОСТ 2093-82.

Реологические характеристики, оцениваемые по эффективной вязкости при скорости сдвига 81 с<sup>-1</sup>, измеряли на ротационном вискозиметре «RHEOTEST-2» в диапазоне скоростей сдвига от 1,0 до 437,4 с<sup>-1</sup> со стандартной системой цилиндров S2 [2].

В соответствии с инструкцией на вискозиметр проба ВУТ предварительно тщательно перемешивалась, помещалась в цилиндрическую измерительную систему и вместе с ней термостатировалась на термостате НААКЕ F3 в течение 30 минут.

<sup>\*</sup> Материалы статьи подготовлены в процессе реализации проекта в рамках частно-государственного партнерства в сфере реализации комплексного проекта по созданию высокотехнологичного производства при финансовой поддержке правительства Российской Федерации (шифр 2010-218-02-174 «Разработка технологии и создание пилотного образца автоматизированного энергогенерирующего комплекса, работающего на отходах углеобогащения»).

Таблица 1. Характеристика суспензионного угольного топлива на основе ф-льтр-кеков ОФ Кузбасса

№ п/п	Зольность, $A^d, \%$	Наименование добавки	Количество добавки от твердой фазы, %	Массовая доля твердой фазы, $C_T \%$	Гранулометрический состав, классы, мм				Низшая теплота сгорания, $Q_i^T$ , МДж/кг (ккал/кг)
					+0,355	0,250-0,355	0,071-0,250	-0,071	
<b>ОФ «Северная»</b>									
1	34,3	Тип С	0,3	60,5	1,0	2,8	13,4	82,8	12,5 (2980)
<b>ЦОФ «Абашевская»</b>									
2	27,4	Вариант В2	1,0	64,3	1,5	3,4	26,0	69,1	12,7 (3026)
<b>ОФ «Щедрухинская»</b>									
3	30,2	Вариант В2	1,0	59,7	0,4	0,2	8,6	90,8	12,9 (3085)
<b>ОФ «Междуреченская», марка «Т»</b>									
4	45,6	Вариант М1	0,31	60,0	0,9	2,1	21,9	75,1	10,1 (2410)
<b>ОФ «Междуреченская», марка «КС»</b>									
5	61,8	Вариант М1	0,31	59,5	0,7	0,6	10,6	88,1	7,0 (1661)
<b>ЦОФ «Кузбасская»</b>									
6	26,9	Вариант В1	1,0	60,1	0,5	0,8	10,0	88,7	13,4 (3200)
<b>ОФ «Красногорская»</b>									
7	24,9	Вариант В1	1,0	60,1	2,5	2,0	10,9	84,0	14,5 (3463)
<b>ОФ «Спутник»</b>									
8	27,2	Вариант В2	1,0	60,4	-	0,1	17,2	82,7	12,9 (3093)

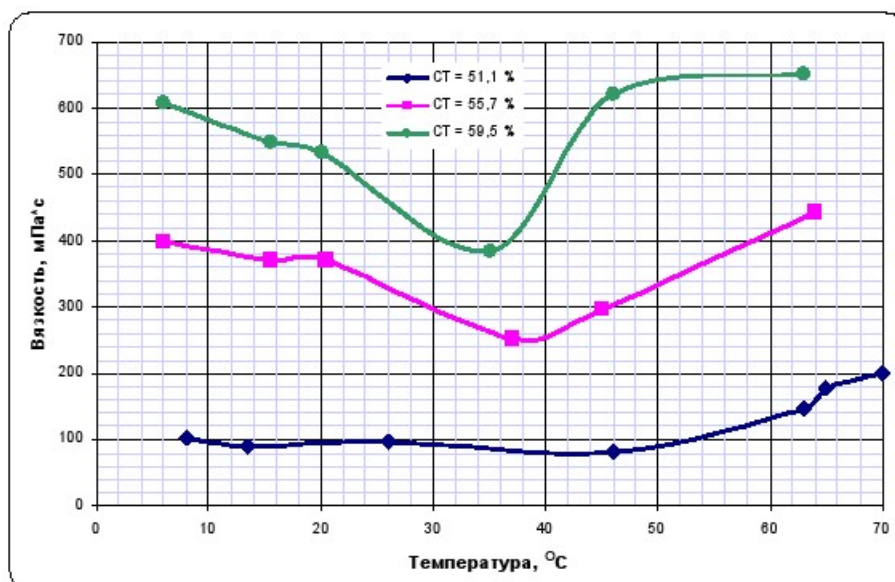


Рис. 1. Зависимость эффективной вязкости при скорости сдвига  $81 \text{ c}^{-1}$  от температуры водоугольной суспензии на основе ф-льтр-кеков ОФ «Междуреченская», марка «КС».

После термостатирования образца ВУТ проводилось измерение крутящего момента при 12 различных фиксированных скоростях вращения ротора в диапазоне 0,278-243 об/мин, что соответствует изменению скорости сдвига от 1,0 до  $437,4 \text{ c}^{-1}$ . Измерения начинались с минимальной скорости.

При всех скоростях вращения ротора регистрировалась величина крутящего момента (напряжения сдвига), соответствующая равновесному значению, т.е. такому, когда момент перестанет изменяться во времени. Следует иметь в виду, что время достижения равновесия могло составлять

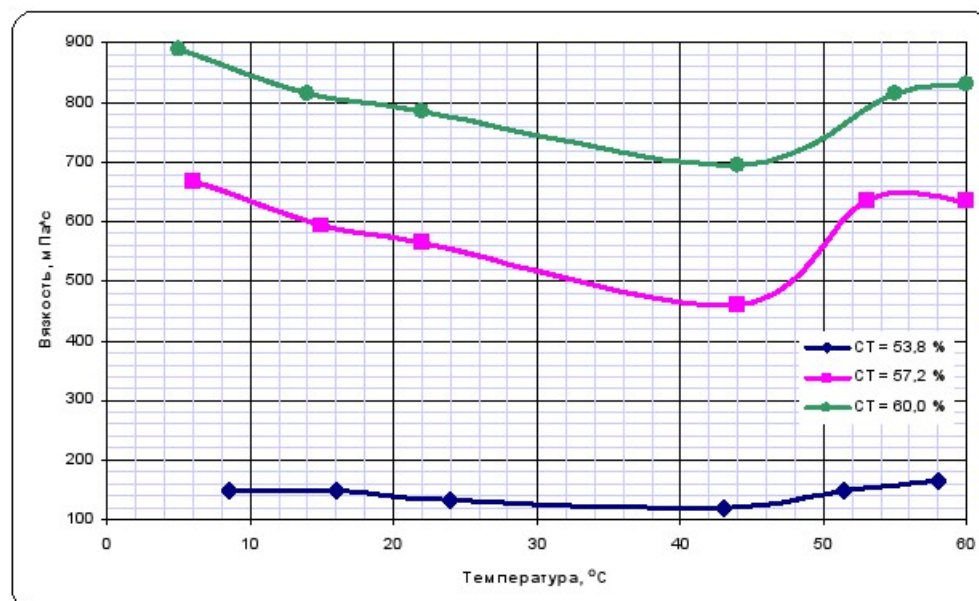


Рис. 2. Зависимость эффективной вязкости при скорости сдвига  $81 \text{ с}^{-1}$  от температуры водоугольной суспензии на основе фильтр-кеков ОФ «Междуреченская», марка «Т».

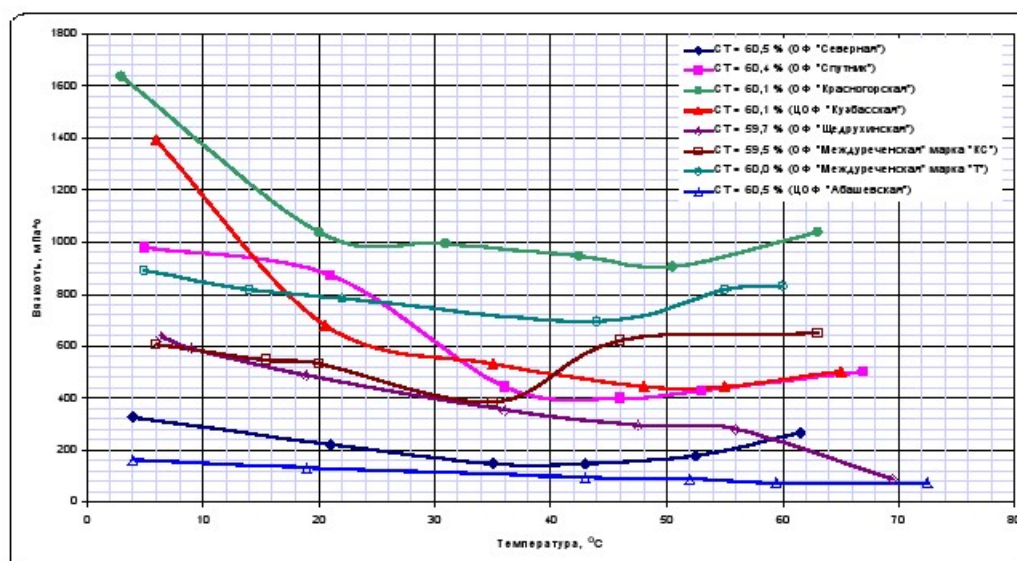


Рис. 3. Зависимость эффективной вязкости при скорости сдвига  $81 \text{ с}^{-1}$  от температуры водоугольной суспензии на основе фильтр-кеков обогатительных фабрик Кузбасса.

несколько минут.

Вискозиметрические измерения для каждой из температур проводили с новой порцией суспензионного угольного топлива, предварительно ее перемешав.

Температурные режимы задавались произвольно, но так чтобы перекрыть рабочий диапазон, причем шаг замеров был неравномерным – более плотным в области ожидаемого снижения вязкости ВУТ.

#### Результаты и их обсуждения

Реологические свойства водоугольных суспензий определяются главным образом свойствами дисперсной твердой фазы (химическим составом

и количеством минеральной части угля, массовой долей твердой фазы и гранулометрическим составом частиц и др.), дисперсионной среды и типом применяемой пластифицирующей добавки [1].

В табл. 1 представлена характеристика суспензионного угольного топлива, приготовленного на основе фильтр-кеков углеперерабатывающих предприятий Кузбасса.

Для того чтобы исключить влияние количества фракций твердой фазы на реологические характеристики угольных суспензий, гранулометрический состав всех полученных ВУТ соответствовал значениям:



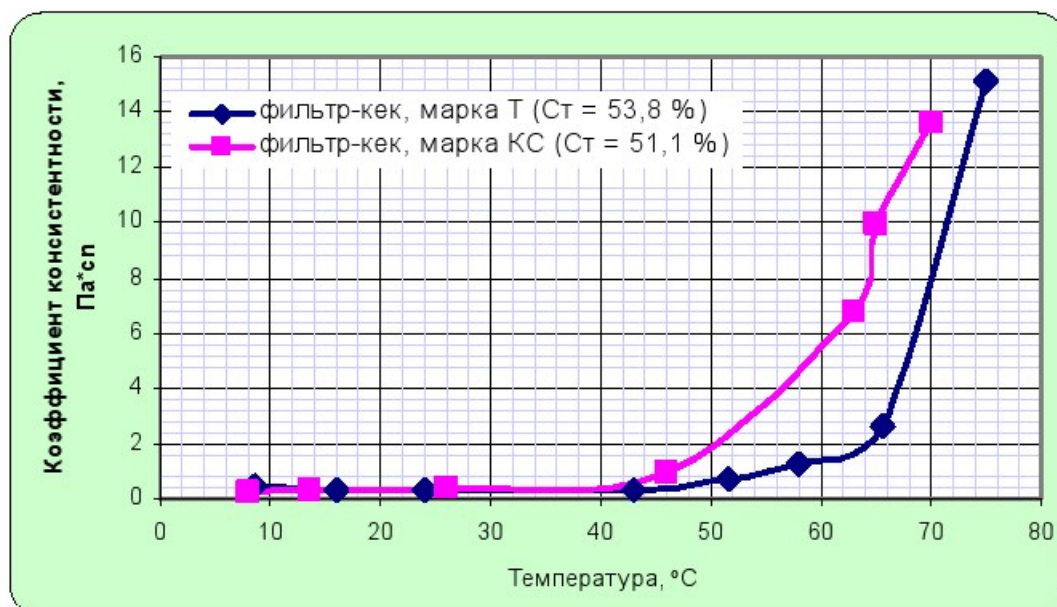


Рис. 4. Зависимость коэффициента консистенции от температуры водоугольной суспензии на основе фильтр-кеков ОФ «Междуреченская».

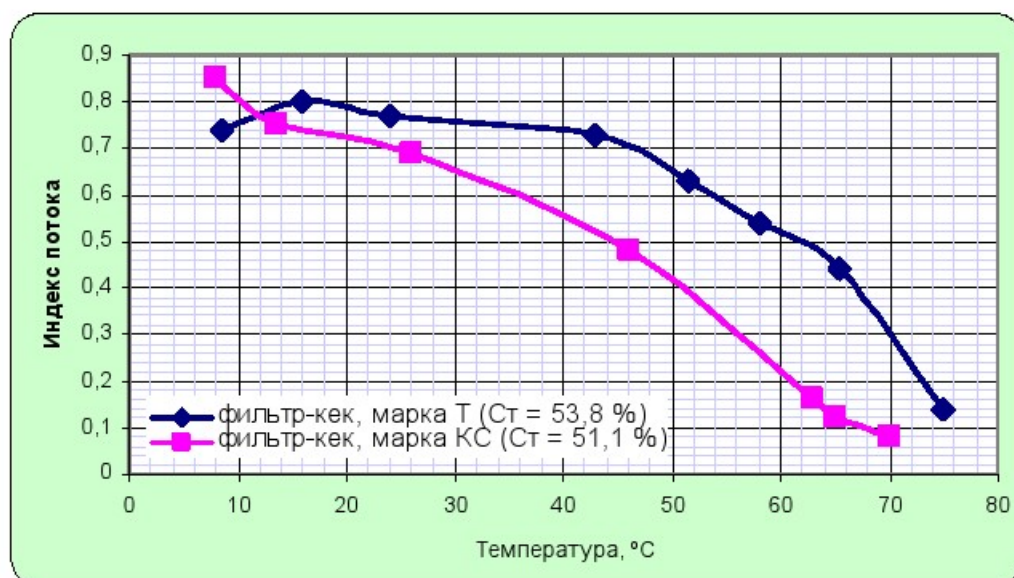


Рис. 5. Зависимость индекса потока от температуры водоугольной суспензии на основе фильтр-кеков ОФ «Междуреченская».

- класс 0-250 мкм - 95-100%;
- класс 0-71 мкм - 70-90%;
- более 250 мкм - 0-5%.

Зольность суспензионного угольного топлива, приготовленного на основе фильтр-кеков обогатительных фабрик, лежала в интервале значений от 25,0 до 35,0%. Исключение составил фильтр-кек с ОФ «Междуреченская» с зольностью  $A^d = 45,6\%$  для марки «Т» и  $A^d = 61,8\%$  для марки «КС», где отбор менее низкозольного продукта на данный момент был невозможен по технологическим причинам.

После проведения экспериментов в диапазоне

изменения температур от 3,0 до 70,0 °C определены коэффициенты, входящие в аналитическую форму реологического уравнения: степенного ( $k, n$ ) и линейного ( $\tau_0, \mu_{\text{н0д}}$ ) с использованием численного метода аппроксимации (программы на языке MathCAD) для каждого образца пробы ВУТ [1]. Результаты этих определений сводились в таблицы, по каждой ОФ отдельно. Графическое отображение зависимости эффективной вязкости при скорости сдвига  $81 \text{ c}^{-1}$  от температуры ВУТ с различным содержанием массы твердой фазы представлено на примере ОФ «Междуреченская» на рис. 1, 2.

На рис.3 сведены кривые зависимости эффек-

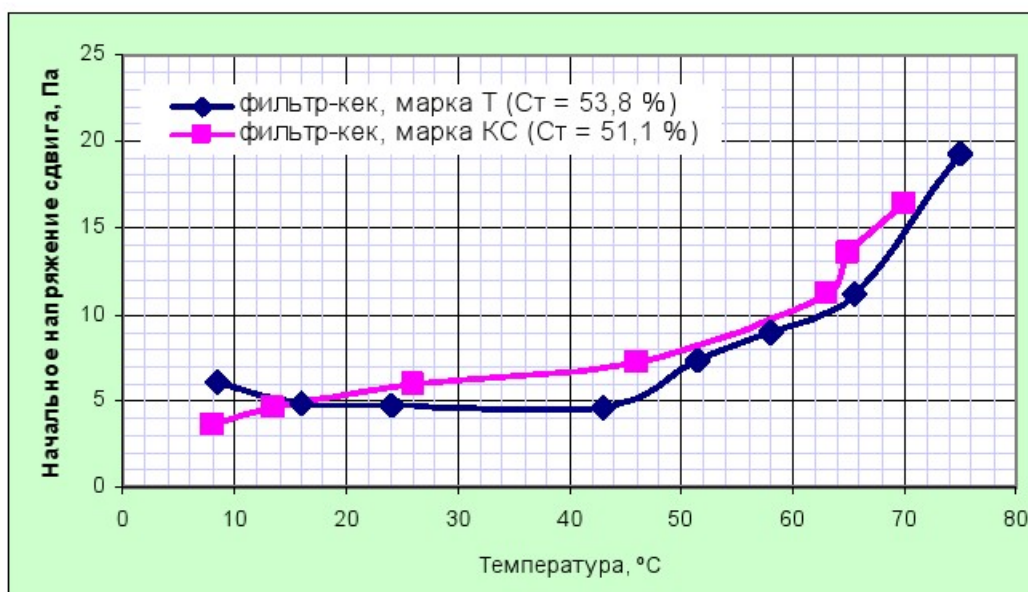


Рис. 6. Зависимость начального напряжения сдвига от температуры водугольной суспензии на основе фильтр-кеков ОФ «Междуреченская».

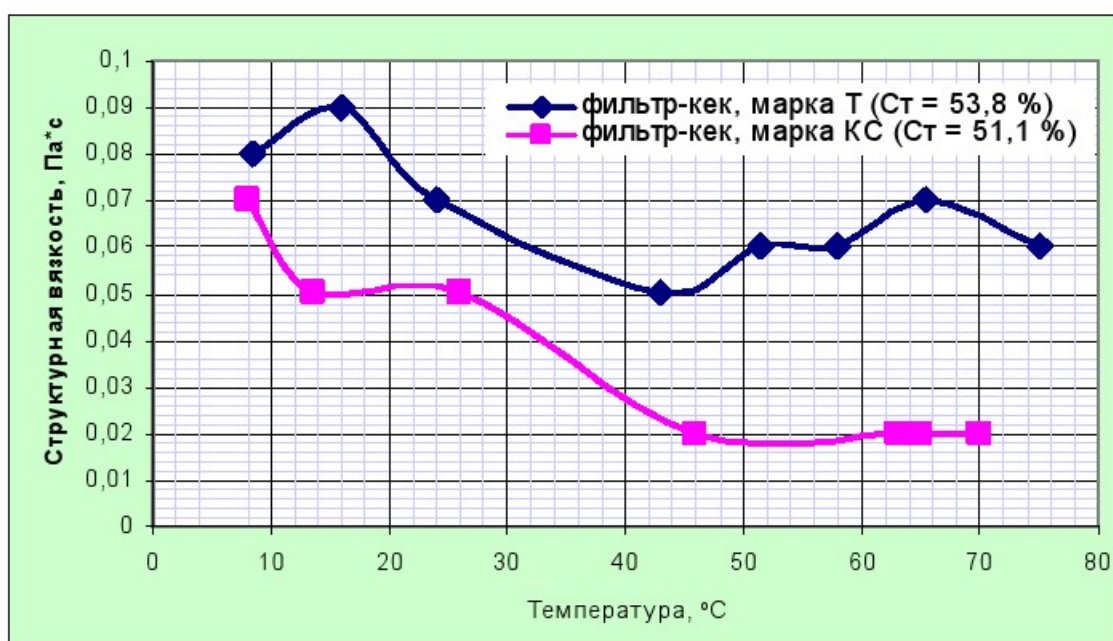


Рис. 7. Зависимость структурной вязкости от температуры водугольной суспензии на основе фильтр-кеков ОФ «Междуреченская».

тивной вязкости при скорости сдвига  $81 \text{ c}^{-1}$  от температуры в исследованных ВУТ, приготовленных на основе восьми образцов фильтр-кеков. Представленные пробы ВУТ имели концентрацию твердой фазы близкую к  $60,0\%$  ( $\pm 0,5\%$ ) и отличались между собой не только маркой угля, от переработки которого на ОФ образовался фильтр-кек, но и используемой для их приготовления пластифицирующей добавкой. Влиянием гранулометрического состава анализируемых ВУТ на ее реоло-

гические характеристики можно пренебречь ввиду максимальной их схожести по выходам классов крупности (см. выше).

Несмотря на то, что характер изменения индивидуален для каждого исследованного ВУТ имеются общие тенденции:

- при повышении температуры суспензии эффективная вязкость при скорости сдвига  $81 \text{ c}^{-1}$  снижается, причем ее минимум лежит в температурном интервале  $42-48^\circ\text{C}$  для всех образцов



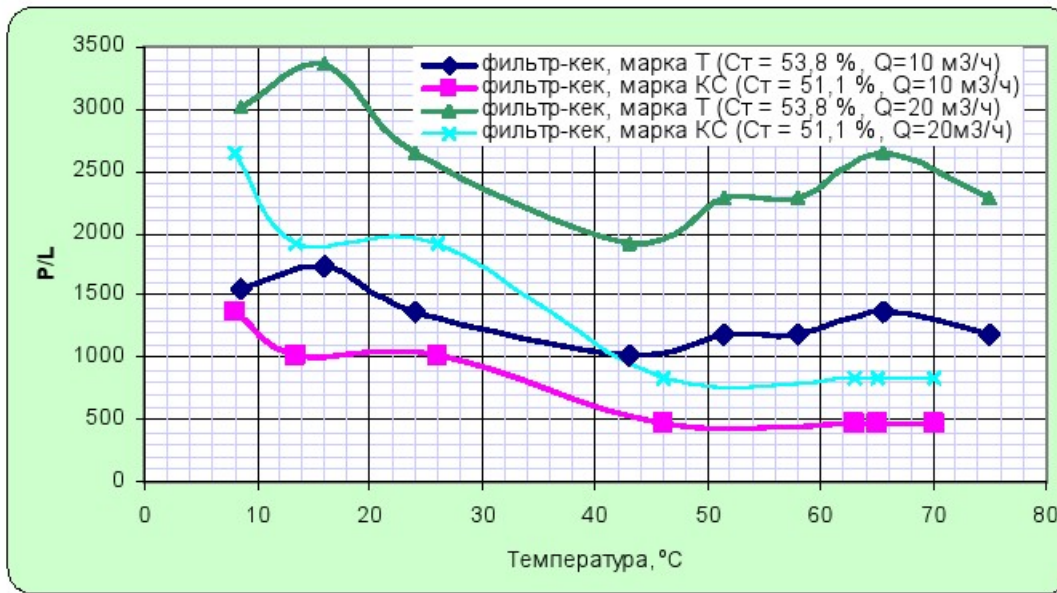


Рис. 8. Зависимость удельного перепада давления для производительности 10 м³/ч и 20 м³/ч при радиусе 0,025 м для бингамовской модели жидкости.

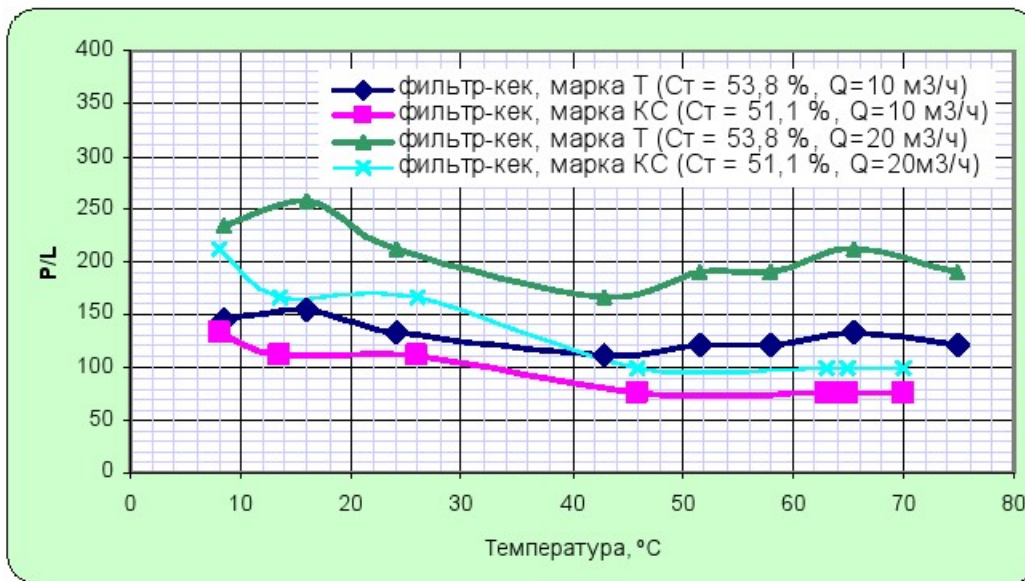


Рис. 9. Зависимость удельного перепада давления для производительности 10 м³/ч и 20 м³/ч при радиусе 0,05 м для бингамовской модели жидкости

ВУТ, кроме марки «КС» ОФ «Междуреченская»;

- увеличение температуры более 50 °С до 65 °С приводит в основном к росту эффективной вязкости, лишь иногда и к ее стабилизации.

- полученная температурная зависимость вязкости не подчиняется выражению через уравнение Аррениуса для неньтоновских жидкостей, какими являются высококонцентрированные водоугольные суспензии.

Графически зависимости реологических параметров ( $\eta$ ,  $K$ ,  $n$ ,  $\tau_0$ ,  $\mu_0$ ) от температуры суспензии (на примере ОФ «Междуреченская») показаны на рис. 4-7.

Учитывая, что по результатам реологических

испытаний лучшей моделью является бингамовская, в дальнейших расчетах использовалась данная модель для определения удельных потерь давления в трубопроводе. Удельные потери давления в трубопроводе для бингамовских жидкостей определяются по формуле (2):

$$\frac{\Delta P}{L} = \left( Q + \frac{\pi R^3}{3\mu_{\text{нбд}}} \right) \times \frac{8\mu_{\text{нбд}}}{\pi \cdot R^4}, \quad (2)$$

где  $Q$  - производительность, м³/ч;

$R$  - радиус трубопровода, м;

$n$  - индекс потока;

$K$  - коэффициент консистенции, Па·с<sup>n</sup>.

Зависимость удельных перепадов давления от температуры для производительностей  $Q_1=10$  м<sup>3</sup>/ч и  $Q_2=20$  м<sup>3</sup>/ч и одном внутреннем радиусе трубопровода ( $R_1=0,025$  м или  $R_2=0,025$  м) представлена графически на рис. 8, 9.

#### Заключение

Как видно из результатов исследований, повышение температуры суспензии до 43-46 °С приводит к снижению удельных гидравлических сопротивлений в трубопроводе:

- с радиусом  $R=0,025$  м на 66-68% абсолют-

ных значений (марка «КС») и 42-43% (марка «Т»);  
- с радиусом  $R=0,05$  м - на 43-53% («КС») и 29-35% («Т»).

Таким образом, при проектировании промышленных технологических комплексов следует принимать во внимание полученную зависимость вязкости от температуры и при технической возможности и экономической целесообразности необходимо использовать устройства для подогрева перекачиваемой суспензии до температуры 42,0-43,0 °С.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Физико-технические основы водоугольного топлива. В.И. Мурко, В.И. Федяев, В.А. Хмяляйнен. Кемерово. Кузбассвуиздат, 2009.
2. Штиллер В... Уравнение Аррениуса и неравновесная кинетика. Изд-во Мир, 2000.

□ Авторы статьи:

Мурко  
Василий Иванович,  
докт.техн.наук., профессор каф.  
теоретической и геотехнической  
механики КузГТУ,  
тел. 89617177514,  
e-mail: sib\_eco@kuz.ru

Вахрушева  
Галина Дмитриевна,  
ведущий инженер СибГИУ,  
тел. 89617177488

Федяев  
Владимир Иванович,  
генеральный директор  
ЗАО НПП «Сибэкотехника»,  
тел. 89617177459

Карпенко  
Виктор Иванович,  
старший научный сотрудник  
(СибГИУ),  
тел. 89617177459

Мастихина  
Вера Павловна,  
старший научный со-  
трудник (СибГИУ),  
тел. 89617177496

Дзюба  
Дмитрий Анатольевич,  
старший научный сотрудник,  
(СибГИУ),  
тел. 89617177430

УДК - 622.794.4:622.66:543.818

А.А. Гуцин, А.Ю. Ермаков, Г.В. Иванов

## СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ ВЛАГОПОГЛОЩЕНИЯ ВЫСУШЕННЫМИ ПРОДУКТАМИ УГЛЕБОГАЩЕНИЯ

Влагопоглощением угля называется его способность поглощать воду из окружающего воздуха, при этом в угле увеличивается содержание связанной воды. Влагопоглощение зависит от температуры и относительной упругости пара воздуха. Поглощение воды из воздуха происходит постепенно, замедляясь до предела гигроскопичности.

В условиях необходимости увеличения конкурентоспособности угольной продукции обогатительных фабрик, наряду со снижением зольности

и содержания серы, снижение влажности углей после их переработки является важной задачей, решение которой позволяет снизить объемы перевозок транспортом балласта в виде избыточной воды, предотвратить смерзаемость угля в вагонах в зимнее время и снизить сверхнормативные простои вагонов под выгрузкой, улучшить технико-экономические показатели перерабатывающих производств: коксохимических заводов, тепловых электростанций и промышленных котельных, не допускать сверхнормативных выбросов в окру-

Таблица 1 Равновесная влажность угля при относительной влажности воздуха

№ п/п	Температура воздуха, °С	Равновесная влажность угля при относительной влажности воздуха, %			
		10	30	50	80
1	2	3	4	5	6
1	25,5	-	13,2	15,8	25,5
2	55,0	4,3	9,8	11,3	17,0
3	85,0	3,3	6,1	7,5	10,8