

УДК 691.54, 662.613.1

DOI: 10.15372/ChUR2022414

EDN: RFACWJ

## Влияние дисперсных высококальциевых угольных летучих зол на свойства композитных цементов

О. М. ШАРОНОВА<sup>1</sup>, Д. Ф. ДУБРОВИН<sup>2</sup>, С. С. ДОБРОСМЫСЛОВ<sup>2,3</sup>, А. Г. АНШИЦ<sup>1,2</sup><sup>1</sup>Институт химии и химической технологии СО РАН ФИЦ “Красноярский научный центр СО РАН”, Красноярск (Россия)

E-mail: shar@icct.ru

<sup>2</sup>Сибирский федеральный университет, Красноярск (Россия)<sup>3</sup>Федеральный исследовательский центр “Красноярский научный центр СО РАН”, Красноярск (Россия)

### Аннотация

Систематически охарактеризованы дисперсные фракции промышленных высококальциевых летучих зол (ВКЛЗ), селективно отобранных в виде фракций 1–4 (Фр1–Фр4) на 1–4 полях электрофильтров установки золоулавливания Красноярской ТЭЦ-2. Определены параметры растекаемости зольных растворов, приготовленных из 100 % каждой из фракций при соотношении вода/связующее = 0.5. Установлено, что величина растекаемости снижается с увеличением удельной поверхности ВКЛЗ от Фр1 к Фр4. Определены параметры цементно-зольных растворов с замещением цемента на 50 и на 20 % каждой из четырех фракций ВКЛЗ. Установлено, что при содержании 20 % ВКЛЗ величина растекаемости цементно-зольных растворов всех фракций удовлетворяет требованиям ГОСТ 1581-2019 для тампонажных цементов. Показателям прочности на сжатие на вторые сутки твердения удовлетворяют образцы на основе тонкодисперсных фракций Фр3 и Фр4. На основе фракции Фр4 приготовлены образцы композитных зольно-цементных составов высокой прочности – более 50 МПа на 28 сутки твердения. В частности, высокая величина прочности на сжатие (62–90 МПа) достигнута для композитных цементов с содержанием 80 и 90 % зольной фракции Фр4 в присутствии суперпластификатора Melflux 5581 F, который способствует эффективному диспергированию в жидкой фазе тонкодисперсной ВКЛЗ, более быстрому и полному взаимодействию активных компонентов с образованием упрочняющих гидратных фаз. Добавка 5 % микрокремнезема, способствующая образованию дополнительного количества гидросиликатов кальция, позволила достигнуть повышения прочности до 108 МПа. Полученные результаты показали, что тонкодисперсные ВКЛЗ могут применяться в качестве компонентов тампонажных цементов для повышения растекаемости цементно-зольных растворов и для улучшения прочностных свойств высоконаполненных зольно-цементных композитных материалов.

**Ключевые слова:** композитный цемент, высококальциевая летучая зола, суперпластификатор, растекаемость, прочность на сжатие

### ВВЕДЕНИЕ

Угольные ТЭЦ в России сосредоточены преимущественно в регионах Сибири и Дальнего Востока вблизи месторождений угля [1]. Доля угля в суммарном потреблении топлива для Сибирского федерального округа самая высокая в

России – около 80 %, при этом примерно 1/3 потребляемого угля составляет бурый уголь Канско-Ачинского бассейна, от сжигания которого образуются высококальциевые летучие золы (ВКЛЗ) с содержанием СаО 20–40 мас. % [2, 3]. Суммарно в СФО образуется 13 млн т/год золошлаковых отходов, значительную долю ко-

ТАБЛИЦА 1

Характеристики исходных фракций  
ВКЛЗ и портландцемента ЦЕМ I 42.5Н

Образец	d90, мкм	d50, мкм	$S_{уд}$ , м <sup>2</sup> /г	Насыпная плотность, г/см <sup>3</sup>
Фр1	39	12	0.85	1.74
Фр2	40	13	1.14	1.46
Фр3	30	9	1.52	1.28
Фр4	10	4	2.36	1.18
ЦЕМ I 42.5Н	55	20	0.30	1.85

торых составляют именно высококальциевые золы [4].

Наиболее масштабным направлением утилизации энергетических зол является строительная индустрия, в которой золы используются в производстве смешанных цементов и разного типа бетонов [5–7]. При неоспоримых экологических и экономических преимуществах использование летучей золы может приводить к улучшению свойств цементно-зольных растворов, параметров прочности и долговечности конечных изделий. Например, добавление низкокальциевых алюмосиликатных летучих зол класса F позволяет повысить растекаемость строительных растворов, снизить теплоту гидратации и ограничить риск растрескивания, способствуя повышению долговременной прочности [8, 9]. Улучшению растекаемости цементно-зольных растворов способствует сферическая форма остеклованных зольных частиц и низкая пуццолановая активность алюмосиликатного стекла на начальной стадии гидратации [10].

Преимуществами применения высококальциевых летучих зол (ВКЛЗ) с содержанием CaO 20–40 % являются увеличение ранней и долговременной прочности цементно-зольных композитных материалов по сравнению с цементными образцами [11, 12], ускорение закрытия трещин в бетонах при более высоком содержании ВКЛЗ в цементно-зольной смеси [13]. Повышение прочности обеспечивается за счет гидравлически активных соединений кальция, таких как алюминат  $Ca_3Al_2O_6$ , алюмоферрит  $Ca_4Al_2Fe_2O_{10}$ , сульфат кальция  $CaSO_4$ , активность которых наблюдается уже на ранней стадии гидратации. Вклад кальций-силикатного стекла в увеличение прочности возрастает при долговременном твердении [12]. Высококальциевые летучие золы, локализованные на разных полях электрофильтров, представляют собой дисперсные продукты разделения (зольные

фракции), радикально различающиеся между собой по фракционному составу и в значительной мере по химическому и фазовому составу, но стабилизированные по составу и свойствам по сравнению с золами золоотвалов [14, 15]. Их влияние на свойства композитных цементов практически не изучены.

Цель данной работы – изучение влияния состава и дисперсности ВКЛЗ на параметры цементно-зольных растворов и прочностные свойства для оценки перспектив их применения в качестве компонентов композитных тампонажных и высокопрочных цементов.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

### Исходные компоненты для композитных цементов

В качестве исходных компонентов использовался портландцемент ЦЕМ I 42.5Н (ПЦ) Красноярского цементного завода и высококальциевые летучие золы (ВКЛЗ) Красноярской ТЭЦ-2. Эти ВКЛЗ получены при пылевидном сжигании бурого угля марки Б2 Канско-Ачинского бассейна в котлоагрегатах типа БКЗ-420 с жидким шлакоудалением. Отбор проб ВКЛЗ выполнен с каждого из четырех полей электрофильтров на установке с эффективностью золоулавливания  $\geq 98$  %.

Методы исследования ВКЛЗ детально описаны ранее [16]. Распределение по размерам частиц (табл. 1) получено с помощью лазерного анализатора частиц Analysette 22 MicroTec (Fritsch, Германия) с использованием сухой ячейки. Изображения исходных зол (рис. 1) регистрировали с применением сканирующего электронного микроскопа ТМ-1000 (Hitachi, Япония). Макрокомпонентный состав (компоненты  $SiO_2$ ,  $Al_2O_3$ ,  $Fe_2O_3$ , CaO, MgO,  $SO_3$ ,  $Na_2O$ ,  $K_2O$ ,  $TiO_2$ ) и потери при прокаливании (п. п. п.) определены методами химического анализа по ГОСТ 5382-2019 и приведены в табл. 2. Количественный фазовый состав (табл. 3) рассчитан с применением полнопрофильного метода Ритвельда и минимизации производной разности [16]. Рентгенограммы регистрировали в геометрии на отражение с использованием  $CoK_{\alpha}$ -излучения с помощью дифрактометра X'Pert PRO (PANalytical, Нидерланды) с детектором PIXcel и графитовым монохроматором. Сканирование рентгенограмм проводилось в диапазоне углов дифракции  $2\theta = 7-100^\circ$ . Содержание кристаллической и аморфной компоненты определялось методом внешнего стандарта, в качестве которого ис-

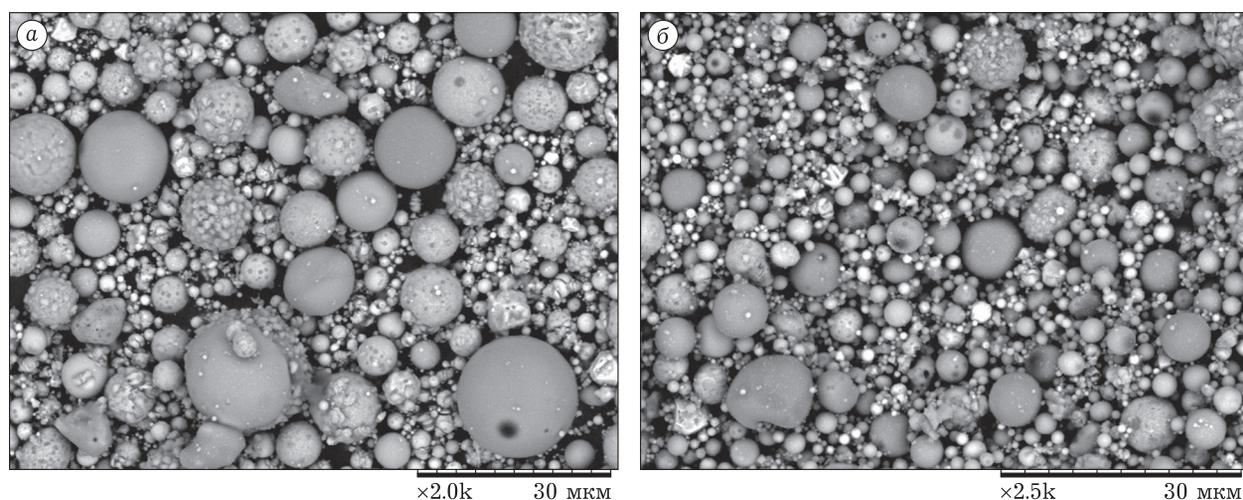


Рис. 1. Электронно-микроскопические изображения фракций ВКЛЗ: а – фракция Фр1; б – фракция Фр4.

пользовался корунд. Коэффициенты поглощения образцов для  $\text{CoK}_\alpha$ -излучения рассчитывались исходя из общего элементного состава по данным химического анализа.

Удельную поверхность ( $S_{уд}$ ) определяли с помощью сорбционного анализатора NOVA 3200e (Quantachrome Instruments, США) в режиме низкотемпературной адсорбции/десорбции азо-

ТАБЛИЦА 2

Химический состав фракций ВКЛЗ с 1–4 полей электрофильтров (Фр1–Фр4) и портландцемента ЦЕМ I 42.5Н (ПЦ) [12], мас. %

ВКЛЗ	Компонент									
	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	SO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	п. п. п.
Фр1	46.15	20.89	4.53	12.65	9.92	3.60	0.75	0.20	0.25	0.60
Фр2	40.60	27.60	4.43	12.06	9.28	3.83	0.80	0.23	0.27	0.60
Фр3	40.00	24.26	6.71	13.45	9.60	3.94	0.72	0.18	0.20	1.00
Фр4	39.69	24.60	7.30	14.29	8.24	2.29	0.71	0.20	0.25	1.96
ПЦ	63.99	20.41	4.87	4.18	–	2.46	–	–	–	–

Примечания. Здесь и в табл. 3: 1. ВКЛЗ – высококальциевые летучие золы; п. п. п. – потери при прокаливании. 2. Прочерк – компонент отсутствует.

ТАБЛИЦА 3

Фазовый состав фракций ВКЛЗ 1–4 полей электрофильтров (Фр1–Фр4) и портландцемента ЦЕМ I 42.5Н (ПЦ) [12], мас. %

ВКЛЗ	Фазы													
	Ca <sub>3</sub> Al <sub>2</sub> O <sub>6</sub>	Ca <sub>2</sub> Fe <sub>x</sub> Al <sub>y</sub> O <sub>5</sub>	CaO	MgO	α-SiO <sub>2</sub>	CaCO <sub>3</sub>	CaSO <sub>4</sub>	Ca(OH) <sub>2</sub>	Ca <sub>3</sub> SiO <sub>5</sub>	Ca <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub>	Ферро-шпинель	CaSO <sub>4</sub> · 0.5H <sub>2</sub> O	CaSO <sub>4</sub> · 2H <sub>2</sub> O	Аморфная фаза
Фр1	12.7	18.7	23.5	9.3	6.2	–	7.4	–	–	–	3.2	–	–	19.0
Фр2	16.0	13.4	14.6	7.5	9.1	3.9	4.8	–	–	–	2.1	–	–	28.6
Фр3	14.7	13.8	14.0	6.9	6.7	3.0	5.8	–	–	–	2.6	–	–	32.6
Фр4	9.9	16.9	4.2	5.7	5.3	4.9	6.5	2.1	–	–	2.4	–	–	42.1
ПЦ	5.8	13.2	–	–	0.5	2.4	–	–	64.5	9.2	–	3.9	0.5	–

Примечание. Обозн. см. табл. 2.

ТАБЛИЦА 4

Составы смесей композитных образцов

Образец	Фракция 3	Фракция 4	ПЦ	В/С	СП	МК
Фр3_04	100	–	–	0.4	–	–
Фр4_04	–	100	–	0.4	–	–
ПЦ_04	–	–	100	0.4	–	–
Фр3_025	100	–	–	0.25	0.12	–
Фр4_025	–	100	–	0.25	0.12	–
90Фр4	–	90	10	0.25	0.12	–
80Фр4	–	80	20	0.25	0.12	–
Фр4-03	–	100	–	0.25	0.3	–
80Фр4-03	–	80	20	0.25	0.3	–
80Фр4-03МК	–	80	20	0.25	0.3	5

Примечания. 1. ПЦ – портландцемент ЦЕМ I 42.5Н; В/С – соотношение вода/связующее; СП – суперпластификатор Melflux 5581 F; МК – микрокремнезем. 2. Прочерк – компонент отсутствует.

та при  $-195.8$  °C ( $77.35$  K) в области относительных значений давления  $P/P_0 = 0.01-0.995$ . Предварительно осуществляли дегазацию образца при  $60$  °C в течение  $4$  ч до остаточного давления  $P < 0.01$  мм рт. ст. Расчет  $S_{уд}$  производился по модифицированному методу БЭТ в соответствии с международным стандартом ISO 9277:2010(E). Данные также представлены в табл. 1.

#### Приготовление растворов композитных цемента и отвержденных образцов

Зольные растворы были приготовлены из  $100$  % каждой из четырех фракций ВКЛЗ при соотношении вода/связующее (В/С) =  $0.5$ , а также в смеси с ПЦ при содержании каждой из фракций ВКЛЗ  $50$  и  $20$  %. Для сравнения был приготовлен цементный раствор – на основе  $100$  % ЦЕМ I 42.5Н при В/С =  $0.5$ . Испытания растекаемости ( $F$ ) цементного раствора выполнены по ГОСТ 34532-2019 “Цементы тампонажные. Методы испытаний” с использованием формы-конуса заданного размера. Время перемешивания раствора составляло  $180$  с. За растекаемость принимали среднеарифметическое значение результатов двух измерений, расхождение между которыми не должно быть более  $10$  мм.

Для определения прочности на сжатие ( $\sigma_{сж}$ ) приготовлены образцы в виде кубиков  $20 \times 20 \times 20$  мм при соотношении В/С =  $0.4$  и  $0.25$  (табл. 4). Для сохранения необходимой текучести при В/С =  $0.25$  в воду добавляли поликарбоксилатный суперпластификатор Melflux 5581 F ( $0.12$  и  $0.3$  %, см. табл. 4). Твердение образцов осуществлялось над слоем воды в эксикаторе в течение  $1-28$  сут. Испытания прочности образцов выполнены с помощью настольной

двухколонной испытательной машины Instron 3360 (Instron, США) со скоростью движения траверса  $5$  мм/мин.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

##### Определение параметров зольных и цементно-зольных растворов

Фракции ВКЛЗ представляют собой микросферический материал и значительно отличаются между собой по размерам частиц (см. рис. 1, табл. 1). В ряду фракций ВКЛЗ от Фр1 до Фр4 наблюдается уменьшение размера частиц: величины  $d_{90}$  и  $d_{50}$  снижаются от  $40$  до  $10$  мкм и от  $13$  до  $4$  мкм соответственно. Портландцемент ЦЕМ I 42.5Н отличается от зольных фракций несколько большими размерами частиц: величина  $d_{90}$  составляет  $55$  мкм,  $d_{50}$  –  $20$  мкм. Испытания растекаемости  $F$  показали, что ее величина радикально уменьшается (от  $261$  до  $70$  мм) при переходе от Фр1 к Фр4 (рис. 2). При этом растекаемость для фракций Фр1 и Фр2 выше, а для Фр3 и Фр4 ниже по сравнению с ЦЕМ I 42.5Н в аналогичных условиях.

Уменьшение размера частиц порошковых материалов приводит к вполне закономерному увеличению их удельной поверхности. Для исходных зольных фракций и ЦЕМ I 42.5Н наблюдается единая зависимость  $S_{уд}$  от величины  $d_{90}$ , которая описывается линейным уравнением регрессии  $S_{уд} = 2.84 - 0.05 \cdot (d_{90})$  с коэффициентом корреляции  $r = -0.99$  (рис. 3). Общая удельная поверхность порошковых материалов определяется, в первую очередь, размерами частиц, но на нее оказывают влияние также и

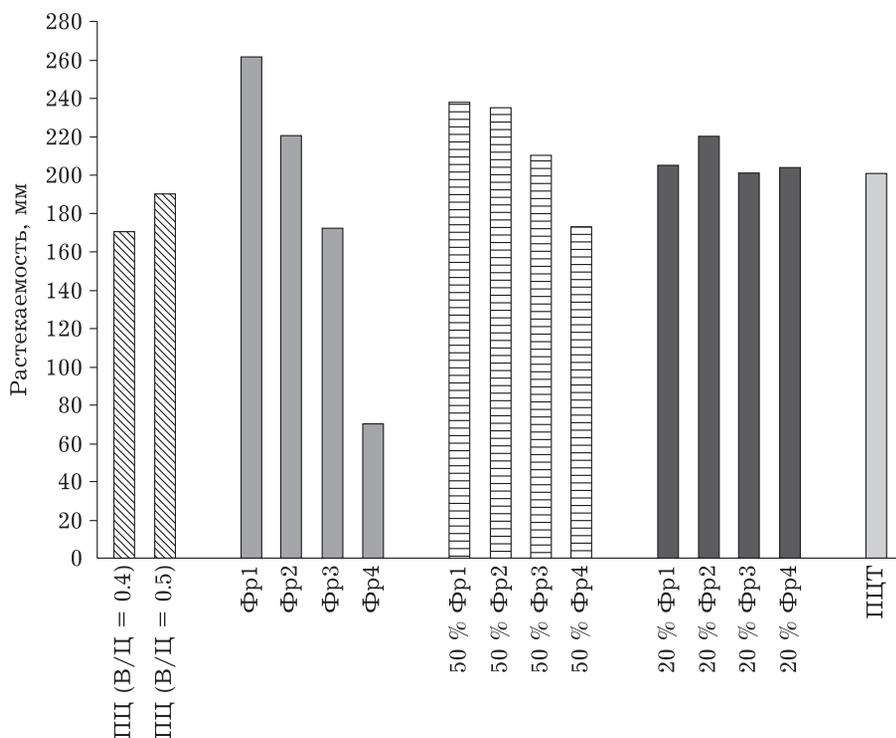


Рис. 2. Величина растекаемости: для ЦЕМ I 42.5Н (ПЦ) при соотношении вода/связующее = 0.4 и 0.5; для зольных растворов на основе каждой из фракций Фр1–Фр4; для цементно-зольных растворов с содержанием 50 и 20 % высококальциевых летучих зол (ВКЛЗ); для портландцемента тампонажного (ПЦТ). В/Ц – вода/цемент.

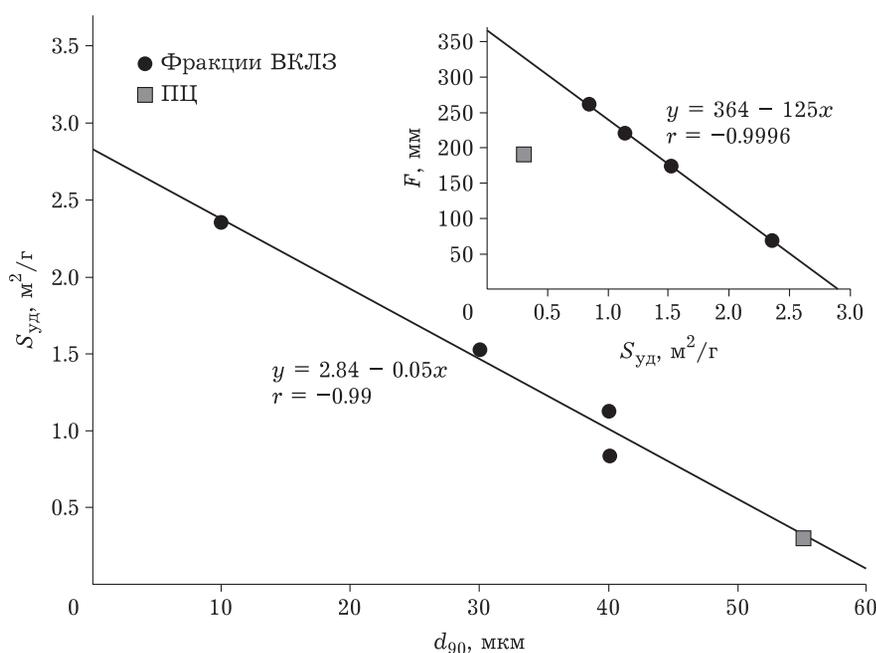


Рис. 3. Зависимость удельной поверхности ( $S_{уд}$ ) от величины  $d_{90}$  для фракций высококальциевых летучих зол (ВКЛЗ) и портландцемента ЦЕМ I 42.5Н (ПЦ). На врезке приведена зависимость растекаемости ( $F$ ) от  $S_{уд}$ .

другие факторы, такие как плотность частиц, пористость. Например, самые крупные фракции Фр1 и Фр2 имеют достаточно близкие размеры

частиц, но при этом различаются по насыпной плотности (1.74 и 1.46 г/см<sup>3</sup> соответственно) и удельной поверхности (0.85 и 1.14 м<sup>2</sup>/г соответ-

ственно) (см. табл. 1). Различие в этих характеристиках обусловлено разностью составов фракций Фр1 и Фр2, в частности, по содержанию преобладающих компонентов: СаО в химическом составе (см. табл. 2) и аморфной фазы в фазовом составе (см. табл. 3).

Зависимость растекаемости  $F$  от удельной поверхности ВКЛЗ четырех фракций описывается линейным уравнением регрессии  $F = 364 - 125S_{уд}$  с коэффициентом корреляции  $r = -0.9996$  (см. рис. 3). Отсюда следует, что удельная поверхность является главным фактором влияния на растекаемость растворов на основе 100 % ВКЛЗ при соотношении В/С = 0.5. При близких размерах величин  $d_{90}$  и  $d_{50}$  фракции Фр1 и Фр2 существенно различаются по растекаемости – величина  $F$  составляет 261 и 220 мм соответственно, что обусловлено различием их удельной поверхности. При этом величина  $F$  для цементного раствора находится существенно ниже этой корреляции. Значительно более высокая растекаемость зольных растворов обеспечивается тем, что фракции ВКЛЗ практически полностью состоят из сферических частиц (см. рис. 1).

При изменении состава вяжущего материала путем замены 50 % ВКЛЗ на цемент ЦЕМ I 42.5Н тенденция снижения растекаемости цементно-зольного раствора при переходе от фракции Фр1 к Фр4 сохраняется, но существенно сужается интервал изменения – величина  $F$  уменьшается от 238 до 173 мм (см. рис. 2). При уменьшении содержания ВКЛЗ до 20 % растекаемость находится в интервале 220–201 мм, что превышает ее величину для цементного раствора (190 мм), близко к величине  $F$  тампонажного цемента марки ПЦТ I-G-CC-1 (201 мм) и удовлетворяет требованиям ГОСТ 1581-2019 “Портландцементы тампонажные. Технические условия”, согласно которому растекаемость цементного теста должна быть не менее 200 мм при соотношении вода/цемент (В/Ц) = 0.5. Радикальное изменение свойств растекаемости смешанных цементно-зольных растворов, особенно при введении тонкодисперсных фракций Фр 3 и Фр4, связано с эффектом бимодального фракционного состава дисперсной фазы [17], состоящего в том, что вязкость суспензий при определенном соотношении тонкой и крупной фракций может быть многократно меньше вязкости суспензий на основе полифракционных или монофракционных порошков с тем же содержанием твердой фазы.

Несмотря на то, что по величине растекаемости при 20 %-м содержании фракций ВКЛЗ

все они близки, наблюдаются значительные различия прочности на сжатие. Низкая величина  $\sigma_{сж}$  на вторые сутки твердения составила около 9 и 10 МПа для фракций Фр1 и Фр2 соответственно. Более высокая величина  $\sigma_{сж}$  получена для Фр3 и Фр4 – 17 и 15 МПа соответственно, что достаточно близко к значению 19 МПа тампонажного цемента ПЦТ и позволяет использовать фракции Фр3 и Фр4 в качестве компонента этих цементов при содержании 20 %.

### Высокопрочные композитные материалы

Для получения композитных цементов высокой прочности (более 50 МПа) использовались самые тонкодисперсные фракции – Фр3 и Фр4. Повышение прочности зольных и зольно-цементных вяжущих достигалось путем варьирования соотношения В/С с применением суперпластификатора, а также оптимизации состава смеси ВКЛЗ-ПЦ. При отношении В/С = 0.4 без суперпластификатора прочность на сжатие вяжущего материала на основе 100 % ВКЛЗ имеет низкие показатели – 10 МПа для Фр3 и 22 МПа для Фр4 при твердении 28 сут (рис. 4), которые значительно уступают ПЦ 42.5Н (48 МПа). Уменьшение соотношения В/С до 0.25 в присутствии 0.12 % суперпластификатора Melflux 5581 F позволило сохранить необходимую подвижность зольного раствора и повысить прочность. При этом величина  $\sigma_{сж}$  возросла более чем вдвое – до 23 МПа для Фр3 и до 46 МПа для Фр4 при тех же сроках твердения (см. рис. 4), приблизившись к показателю ПЦ в случае Фр4. Melflux 5581 F – это поликарбоксилатный суперпластификатор, состоящий из боковых цепочек метоксиполиэтиленгликоля, прикрепленных к основной цепи полиметакриловой кислоты. Механизм диспергирования с помощью Melflux 5581 F считается связанным с электростатическими силами отталкивания, создаваемыми карбоксильными функциональными группами ( $-\text{COO}^-$ ) основной цепи на поверхности зерен цемента и с эффектом стерического затруднения, создаваемым гидрофобными боковыми цепями метоксиполиэтиленгликоля [18]. Эффективное диспергирование тонкодисперсного вяжущего материала способствует более быстрому и полному взаимодействию компонентов при растворении и образовании новых фаз.

Добавки ПЦ способствуют активизации зольного стекла в процессе гидратации [15]. Поэтому для зольно-цементных вяжущих на основе фракции Фр4 при добавке 10 % ЦЕМ I 42.5Н (состав ВКЛЗ/ПЦ = 90 : 10), соотношении

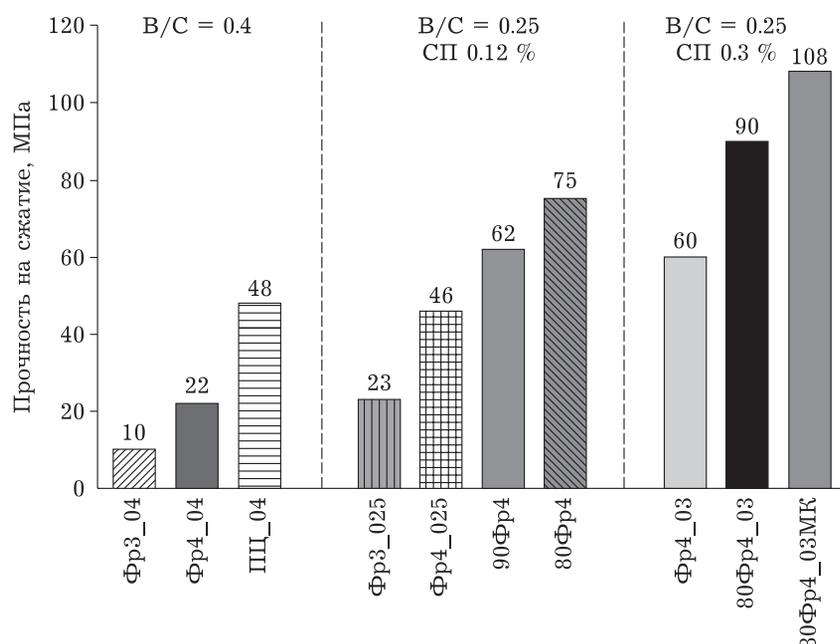


Рис. 4. Прочность на сжатие на 28 сутки: при соотношении В/С = 0.4 образцов на основе фракций Фр3, Фр4 и ПЦ; при В/С = 0.25 и добавке 0.12 % СП образцов на основе Фр3, Фр4, 90 % Фр4 и 80 % Фр4; при В/С = 0.25 и добавке 0.3 % СП на основе Фр4, 80 % Фр4 и 80 % Фр4-МК с добавкой 5 % МК. ПЦ – портландцемент ЦЕМ I 42.5Н; В/С – вода/связующее; СП – суперпластификатор Melflux 5581 F; МК – микрокремнезем.

В/С = 0.25 и содержании 0.12 % Melflux 5581 F наблюдалось увеличение прочности от 46 до 62 МПа при 28 сут твердения. Еще большее увеличение достигалось при добавке 20 % цемента (состав ВКЛЗ/ПЦ = 80 : 20) – до 75 МПа при аналогичных сроках твердения (см. рис. 4).

Ранее нами было установлено, что на зависимости прочности от концентрации суперпластификатора имеется максимум в интервале 0.3–0.4 % [19], при котором прочность возрастает еще примерно на 25 %. Поэтому для образца на основе 100 % Фр4 при В/С = 0.25 с добавкой 0.3 % Melflux 5581F прочность на сжатие увеличилась от 46 до 60 МПа при 28 сут твердения, а для состава ВКЛЗ-ПЦ (ВКЛЗ/ПЦ = 80 : 20) она возросла от 75 до 90 МПа. На этом составе проверен эффект влияния добавки 5 % микрокремнезема (МК): прочность образца 80 % Фр4-МК составила 108 МПа на 28 сутки (см. рис. 4).

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Изучены свойства зольных растворов на основе четырех фракций ВКЛЗ при соотношении В/С = 0.5, различающихся составом и дисперсностью. Установлено, что величина растекаемо-

сти *F* значительно снижается (от 261 до 70 мм) и описывается зависимостью от удельной поверхности  $S_{уд}$  в соответствии с линейным уравнением регрессии  $F = 364 - 125S_{уд}$  (коэффициент корреляции  $-0.9996$ ). Определены параметры цементно-зольных растворов с замещением цемента на 50 и на 20 % каждой из четырех фракций ВКЛЗ. Установлено, что при содержании ВКЛЗ 20 % величина *F* цементно-зольных растворов для каждой из четырех фракций находится в интервале 220–201 мм, что удовлетворяет требованиям ГОСТ 1581-2019 по растекаемости для тампонажных цементов.

Высокая величина прочности на сжатие (62–90 МПа на 28 сутки) достигнута для композитных зольно-цементных составов с содержанием 80 и 90 % тонкодисперсной фракции ВКЛЗ Фр4 при соотношении В/С = 0.25 и применении суперпластификатора Melflux 5581 F. Добавка 5 % микрокремнезема, способствующая образованию дополнительного количества гидросиликатов кальция, позволила достигнуть повышения прочности до 108 МПа.

Работа выполнена в рамках государственного задания Института химии и химической технологии СО РАН (проект № 0287-2021-0013) с использованием оборудования Красноярского регионального центра коллективного пользования ФИЦ КНЦ СО РАН.

Авторы выражают благодарность сотрудникам ИХХТ СО РАН Е. В. Мазуровой за получение СЭМ-изображений и В. В. Юмашеву за определение удельной поверхности.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Филиппов С. П., Дильман М. Д. ТЭЦ в России: необходимость технологического обновления // Теплоэнергетика. 2018. Т. 65, № 11. С. 5–22.
- 2 ЦДУ ТЭК. Уголь России и мира: производство, потребление, экспорт, импорт [Электронный ресурс]. URL: [http://www.cdu.ru/tek\\_russia/articles/5/](http://www.cdu.ru/tek_russia/articles/5/) (дата обращения: 27.09.2021).
- 3 Веселов Ф. В., Ерохина И. В., Новикова Т. В., Хоршев А. А. Перспективы использования угля в российской теплоэнергетике // Конференция “УгольЭко-2016”. Москва, 2016 [Электронный ресурс]. URL: <http://coaleco.ru/wp-content/uploads/2016/10/4-Veselov-INEI-Perspektivy-Coaleco2016.pdf> (дата обращения: 04.04.2022).
- 4 Николаев Б. Опасные, но полезные золоотвалы // Независимая газета. 12.10.2020 [Электронный ресурс]. URL: [https://www.ng.ru/energy/2020-10-12/16\\_7987\\_waste.html](https://www.ng.ru/energy/2020-10-12/16_7987_waste.html) (дата обращения: 04.04.2022).
- 5 Yu J., Lu C., Leung Ch. K. Y., Li G. Mechanical properties of green structural concrete with ultrahigh-volume fly ash // Constr. Build. Mater. 2017. Vol. 147. P. 510–518.
- 6 Pranav S., Aggarwal S., Yang E.-H., Sarkar A. K., Singh A. P., Lahoti M. Alternative materials for wearing course of concrete pavements: A critical review // Constr. Build. Mater. 2020. Vol. 236. Art. 117609.
- 7 Zhou J., Gao X., Liu C. Optimization of mix design of micro-concrete for shaking table test // Adv. Concrete Constr. 2022. Vol. 13, No. 3. P. 215–221.
- 8 Choudhary R., Gupta R., Nagar R. Impact on fresh, mechanical, and microstructural properties of high strength self-compacting concrete by marble cutting slurry waste, fly ash, and silica fume // Constr. Build. Mater. 2020. Vol. 239. Art. 117888.
- 9 Jiang D., Li X., Lv Y., Zhou M., He C., Jiang W., Liu Z., Li C. Utilization of limestone powder and fly ash in blended cement: Rheology, strength and hydration characteristics // Constr. Build. Mater. 2020. Vol. 232. Art. 117228.
- 10 Giergiczny Z. Fly ash and slag // Cement Concr. Res. 2019. Vol. 124. Art. 105826.
- 11 Ahari R. S., Erdem T. K., Ramyar K. Permeability properties of self-consolidating concrete containing various supplementary cementitious materials // Constr. Build. Mater. 2015. Vol. 79. P. 326–336.
- 12 Sharonova O. M., Yumashev V. V., Solovyov L. A., Anshits A. G. The fine high-calcium fly ash as the basis of composite cementing material // Mag. Civ. Eng. 2019. Vol. 91, No. 7. P. 60–72.
- 13 Chindasiriphan P., Yokota H., Pimpakan P. Effect of fly ash and superabsorbent polymer on concrete self-healing ability // Constr. Build. Mater. 2020. Vol. 233. Art. 116975.
- 14 Lee S. H., Kim K. D., Sakai E., Daimon M. Mineralogical variability of fly ashes classified by electrostatic precipitator // J. Ceram. Soc. Jpn. 2003. Vol. 111, No. 1289. P. 11–15.
- 15 Sharonova O. M., Solovyov L. A., Oreshkina N. A., Yumashev V. V., Anshits A. G. Composition of high-calcium fly ash middlings selectively sampled from ash collection facility and prospect of their utilization as component of cementing materials // Fuel Process. Technol. 2010. Vol. 91. P. 573–581.
- 16 Sharonova O. M., Kirilets V. M., Yumashev V. V., Solovyov L. A., Anshits A. G. Phase composition of high strength binding materials based on fine microspherical high-calcium fly ash // Constr. Build. Mater. 2019. Vol. 216. P. 525–530.
- 17 Ходаков Г. С. Реология суспензий. Теория фазового течения и ее экспериментальное обоснование // Рос. хим. журн. 2003. Т. XLVII, № 2. С. 33–43.
- 18 Li Z. Advanced concrete technology. New Jersey: Wiley & Sons, 2011. 506 p.
- 19 Шаронова О. М., Кирилец В. М., Соловьев Л. А., Аншиц А. Г. Влияние химических добавок на свойства композиционных материалов на основе тонкодисперсной высококальциевой летучей золы // Журн. Сиб. федер. ун-та. Химия. 2020. Т. 13. С. 395–407.