

# ВЛИЯНИЕ ДИСПЕРСНОСТИ ШЛАКОВОГО КОМПОНЕНТА НА СВОЙСТВА ШЛАКОПОРТЛАНДЦЕМЕНТА

**С. В. Самченко, О. В. Земскова, И. В. Козлова,  
Московский государственный строительный университет**

**Ключевые слова:** шлакопортландцемент, ультрадисперсный шлак, сухое смешивание, гидратация, цементный камень, кристаллогидраты, прочность на сжатие, пористость, степень гидратации, размер частиц, тонкомолотые шлаковые составляющие

**Key words:** slag cement, ultrafine slag, dry mixing, hydration, cement stone, crystalline hydrates, compressive strength, porosity, degree of hydration, particle size, fine ground slag components

Шлакопортландцемент (ШПЦ) – уникальный строительный материал, изделия из которого обладают повышенной коррозионной стойкостью, водостойкостью, низкой экзотермией. ШПЦ незаменим при выполнении штукатурных работ, его светлый оттенок позволяет экономить на красителях при отделке. Наиболее ценным является то, что при изготовлении ШПЦ снижается энергоёмкость производства и утилизируются отходы промышленности – доменный гранулированный шлак (ДГШ). Вопросами утилизации промышленных отходов и энергосбережения в нашей стране занималась целая плеяда советских и российских ученых.

Для повышения эффективности использования различных добавок в составе цементных композиций предлагается вводить их в ультрадисперсном состоянии. Проведенные в этом направлении исследования свидетельствуют об эффективности применения таких добавок в составе цемента [1–8].

При ряде преимуществ у ШПЦ есть и недостаток, связанный с медленным набором прочности, особенно в начальные сроки твердения. С целью устранения этого недостатка предлагается использовать ультрадисперсные шлаки.

В качестве ультрадисперсной добавки в ходе исследований применяли измельченный в лабораторной струйной мельнице LHL-1 до размера частиц 1 и 20 мкм ДГШ (г. Нижний Тагил Свердловской области). Его добавляли к ШПЦ в количестве 1, 3 и 5% от массы цемента и смешивали в керамической мельнице в течение 1 ч. ШПЦ готовили в лабораторных условиях путем совместного измельчения в шаровой мельнице МБЛ портландцементного клинкера ПАО «Подольск-Цемент», ДГШ (г. Нижний Тагил Свердловской области) и гипса (ООО «КНАУФ ГИПС НОВОМОСКОВСК»). Размол осуществляли с помощью мелющих тел (стальных шаров), засыпаемых в мельницу вместе с материалом. Полученный цемент просеивали через сито 008. Состав ШПЦ (в %): клинкер 60, шлак 40, гипс 5 (сверх 100%).

Приготовленные смеси ШПЦ с ультрадисперсным ДГШ (УдДГШ) затворяли водой и изучали строительно-технические свойства цементного теста, проводили физико-механические испытания цементного камня и исследовали его структурные характеристики. Размер испытываемых образцов-кубиков 20х20х20 мм.

Установлено, что при введении УдДГШ в ШПЦ нормальная плотность цементного теста не изменяется и составляет 25,5%, а сроки схватывания несколько замедляются (табл. 1). Это позволяет сделать вывод о том, что введение даже незначительного количества тонкоизмельченного шлака приводит к разбавлению цементной системы, причем в большей степени разбавленными оказываются цементно-шлаковые системы, содержащие частицы шлака размером 20 мкм.

Т а б л и ц а 1

Строительно-технические свойства образцов

Номер образца	Размер частиц УдДГШ, мкм	Количество введенного УдДГШ, %	Нормальная плотность, %	Сроки схватывания, ч-мин	
				начало	конец
1	–	–	25,5	2-50	3-40
2	1	1	25,5	2-55	4-10
3		3	25,5	3-00	4-10
4		5	25,5	3-05	4-15
5	20	1	25,5	3-00	4-10
6		3	25,5	3-10	4-15
7		5	25,5	3-20	4-25

О влиянии УдДГШ на прочность при сжатии образцов на основе ШПЦ можно судить по данным, представленным на рис. 1 и в табл. 2.

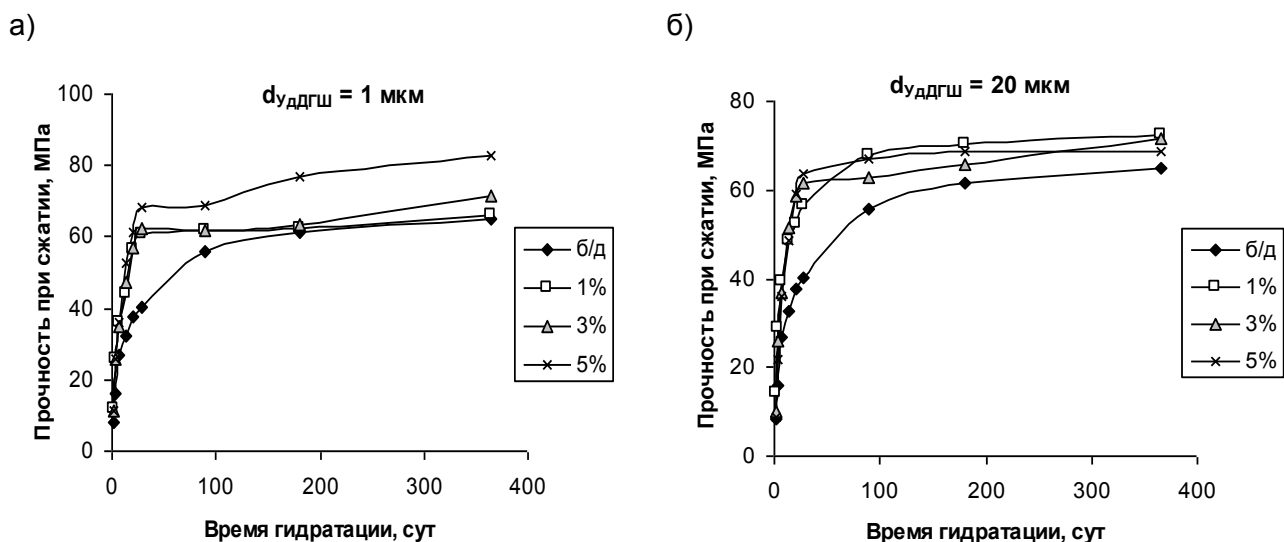


Рис. 1. Влияние УдДГШ на прочность образцов на основе ШПЦ при размере частиц шлака: а – 1 мкм; б – 20 мкм

Т а б л и ц а 2

**Физико-механические свойства образцов**

Номер образца	Размер частиц УдДГШ, мкм	Количество введенного УдДГШ, %	Прочность при сжатии, МПа, в возрасте								
			1 сут	3 сут	7 сут	14 сут	21 сут	28 сут	90 сут	180 сут	365 сут
1	–	–	8,3	16,0	26,67	32,5	37,5	40,08	55,8	61,5	65
2	1	1	12,0	25,67	36,17	44,0	56,25	60,5	61,8	62,2	66,3
3		3	11,3	25,75	35,17	47,33	56,83	62,5	62,0	63,5	71,4
4		5	11,4	26,0	35,83	52,83	61,5	68,5	68,7	77,0	82,6
5	20	1	14,17	28,83	39,33	48,67	52,33	56,67	67,9	70,2	72,5
6		3	9,92	25,83	37,0	51,5	58,83	61,5	62,8	65,8	71,7
7		5	8,83	21,83	36,0	48,75	59,0	63,83	67,2	68,5	68,6

Прирост прочности образцов, содержащих УдДГШ, начинается с первых суток твердения и продолжается в более поздние сроки (вплоть до года).

В начальные сроки твердения наибольший прирост прочности образцов (70–80%) обеспечивает добавка 1% тонкомолотой шлаковой составляющей, особенно измельченной до размера частиц 20 мкм. Через 14–28 сут твердения 5% УдДГШ повышают прочность на 50–70% (максимальное увеличение достигается при измельчении шлаковой составляющей до размера частиц 1 мкм).

В более поздние сроки твердения также наблюдается прирост прочности образцов. При использовании 5% УдДГШ с размером частиц 1 мкм прочностные характеристики образцов в возрасте 3–12 мес (90–365 сут) повышаются в среднем на 25%; введение 1 и 3% УдДГШ оказывает незначительное влияние на прочность образцов к году твердения (увеличение до 10%). Добавка УдДГШ с размером частиц 20 мкм в трехмесячном возрасте способствовала повышению прочности на 13–22%, а через год твердения – на 6–12%, что также несущественно.

Наибольший прирост прочности образцов обеспечивает УдДГШ с размером частиц 1 мкм, вводимый в количестве 3–5%: в возрасте 1–3 сут – 36–60%, а в марочном возрасте – 56–71%. При введении УдДГШ с размером частиц 20 мкм в количестве 1–3% прирост прочности образцов в возрасте 1–3 сут составляет 20–80%, а в марочном возрасте – 41–53%.

Отмечена положительная роль УдДГШ в формировании структуры цементного камня, о чем свидетельствует снижение пористости образцов на основе ШПЦ (рис. 2).

В первые сутки твердения при введении УдДГШ в состав цемента гидратационные процессы протекают медленнее, чем в бездобавочном ШПЦ, при этом общая пористость образцов снижена (рис. 2, а, б). Это указывает на то, что тонкодисперсные частицы шлака заполнили пустоты в цементном камне, но еще полноценно не включились в работу по формированию его структуры.

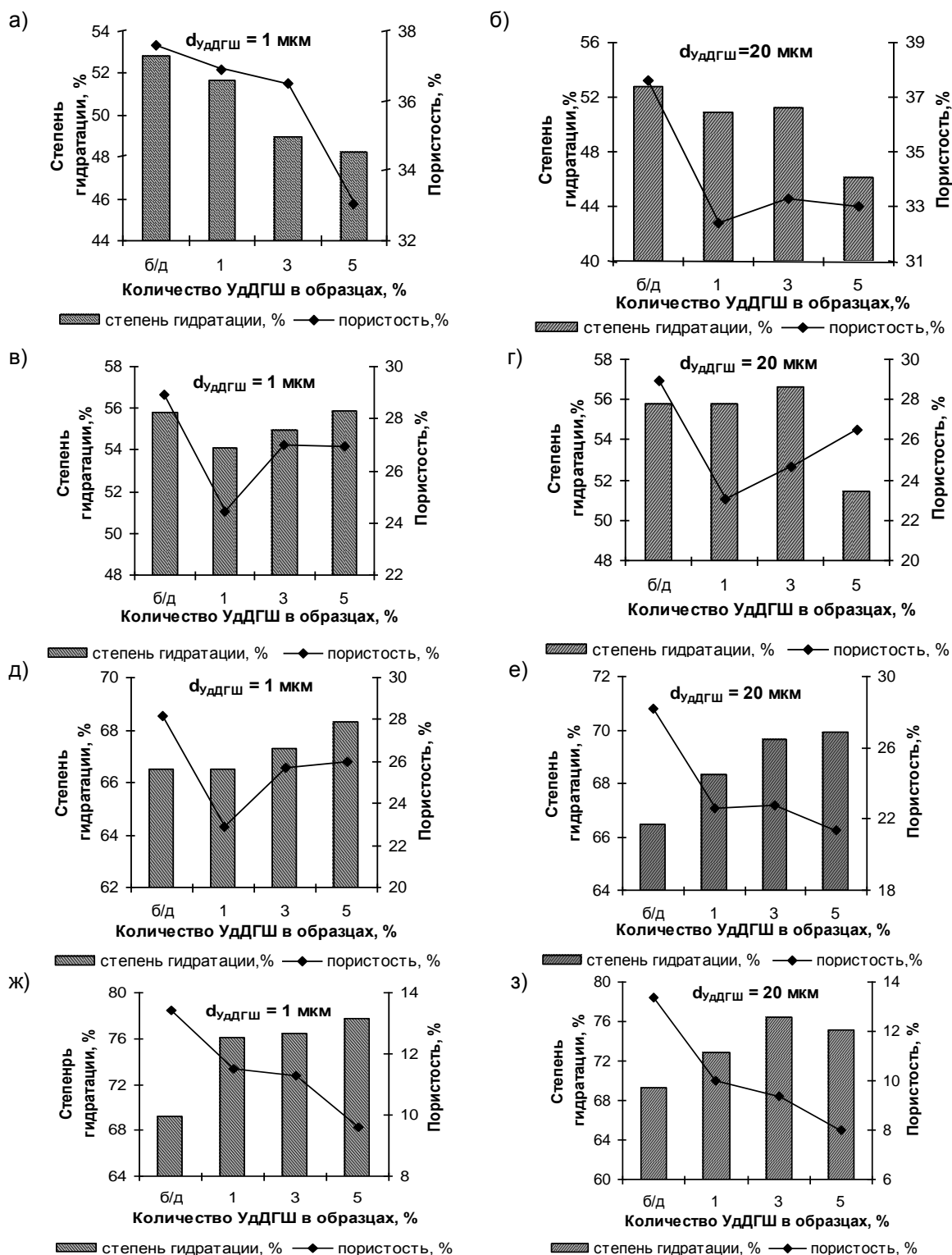


Рис. 2. Степень гидратации и пористость образцов с УДДГШ при твердении в течение:  
а, б – 1 сут; в, г – 3 сут; д, е – 7 сут; ж, з – 28 сут;  
а, в, д, ж –  $d_{уддгш} = 1$  мкм; б, г, е, з –  $d_{уддгш} = 20$  мкм

Через 3 сут твердения степень гидратации образцов, содержащих УДДГШ, находится примерно на уровне степени гидратации бездобавочного ШПЦ. Общая пористость при этом снижена у всех образцов с добавкой ультрадисперсного шлакового компонента, особенно содержащих 1% УДДГШ (добавка шлака с размером частиц 1 мкм обеспечивает снижение пористости на 16%, а с размером частиц 20 мкм – на 20%) (рис. 2, в, г). Формирование подобной плотной структуры цементного камня с участием тонкомолотой шлаковой составляющей обуславливает значительный прирост прочности образцов в возрасте 3 сут (см. табл. 2).

В возрасте 7 сут гидратация образцов, содержащих высокодисперсный компонент, усиливается, особенно при использовании УдДГШ с размером частиц 20 мкм. Максимальное снижение пористости отмечено при введении 1% шлака с размером частиц 1 мкм и 5% шлака с размером частиц 20 мкм (рис. 2, д, е).

Дальнейшее ускорение гидратационных процессов в образцах с добавкой УдДГШ и, соответственно, снижение пористости прослеживается и через 28 сут твердения (рис. 2, ж, з).

Таким образом, добавка 1, 3 и 5% шлака с размером частиц 1 мкм обеспечивает снижение пористости образцов соответственно на 14, 16 и 28%, а введение 1, 3 и 5% шлака с размером частиц 20 мкм – соответственно на 26, 30 и 40%, т. е. снижение примерно в 1,5–2 раза больше. Такой шлак максимально заполняет пространство между гидратирующимися частицами цемента за счет своих более «крупных» размеров по сравнению с УдДГШ с размером частиц 1 мкм. В результате достигается хорошее сцепление частиц и уплотняется структура цементного камня.

На основании представленных данных можно заключить, что УдДГШ распределяется в цементной матрице в качестве центров направленной кристаллизации, способствуя армированию твердеющей водно-цементно-шлаковой системы. Вследствие вступления УдДГШ в реакцию гидратации, приводящую к образованию новых кристаллогидратов, происходит уплотнение цементного каркаса, что положительно сказывается на прочностных характеристиках твердеющей системы.

В ходе исследований определены оптимальные концентрации УдДГШ для ШПЦ: 3–5% при добавке шлака с размером частиц 1 мкм и 1–3% при введении шлака с размером частиц 20 мкм.

Установлено, что характеристики образцов, содержащих шлак с размером частиц 20 мкм, практически не уступают характеристикам образцов с добавкой шлака с размером частиц 1 мкм, а в некоторых случаях и превосходят их (более эффективное снижение пористости). Это дает основание утверждать, что шлак с размером частиц 1 мкм в составе ШПЦ вполне можно заменить шлаком с размером частиц 20 мкм, исключив тем самым дополнительные затраты энергии, связанные со сверхтонким измельчением шлака до дисперсности 1 мкм.

## **Выводы**

1. Введение УдДГШ в состав ШПЦ приводит к уплотнению цементной системы и улучшению прочностных характеристик образцов.

2. В ходе комплексного исследования свойств ШПЦ с тонкомолотой шлаковой составляющей установлено, что наиболее эффективно введение в состав ШПЦ либо 3–5% шлака с размером частиц 1 мкм, либо 1–3% шлака с размером частиц 20 мкм.

3. УдДГШ с размером частиц 20 мкм благодаря своим более «крупным» размерам обеспечивает более эффективное сцепление между частицами и уплотняет структуру цементного камня. Пористость при этом снижается до 40%, что примерно в 1,5–2,0 раза больше, чем при добавке УдДГШ с размером частиц 1 мкм.

4. При введении в цементную систему шлака с размером частиц 1 мкм прочность образцов в начальные сроки твердения увеличивается до 60%, а в марочном возрасте – до 71%. Добавка шлака с размером частиц 20 мкм обеспечивает повышение прочности образцов в начальные сроки твердения до 80%, а в марочном возрасте – до 53%.

5. В целях экономии электроэнергии на сверхтонкое измельчение шлака с размером частиц 1 мкм рекомендовано для повышения эксплуатационных характеристик ШПЦ использовать только шлак с размером частиц 20 мкм в количестве 1–3% от содержания цемента.

## **ЛИТЕРАТУРА**

1. Кузнецова Т. В. Основные направления повышения эффективности производства и применения цемента // Труды МХТИ им. Д. И. Менделеева. – 1985. – № 137. – С. 5–16.
2. Самченко С. В., Виноградов К. А. Утилизация гальваношламов при производстве цемента // Техника и технология силикатов. – 2007. – Т. 14, № 4. – С. 27–29.
3. Кривобородов Ю. Р., Бурлов А. Ю., Бурлов И. Ю. Применение вторичных ресурсов для получения цементов // Строительные материалы. – 2009. – № 2. – С. 44–45.
4. Самченко С. В., Зорин Д. А., Борисенкова И. В. Влияние дисперсности глиноземистого шлака и сульфатоминатного клинкера на формирование структуры цементного камня // Техника и технология силикатов. – 2011. – Т. 18, № 2. – С. 12–14.

5. Самченко С. В., Зорин Д. А. Шлакопортландцемент с компенсированной усадкой // Строительство-2008: Материалы Междунар. науч.-практ. конф. – Ростов н/Д: Рост. гос. строит. ун-т, 2008. – С. 136–138.
6. Осокин А. П., Кривобородов Ю. Р., Самченко С. В. Цементы с повышенной коррозионной стойкостью. – М.: РХТУ им. Д. И. Менделеева, 2002. – 56 с.
7. Кривобородов Ю. Р., Бойко А. А. Влияние минеральных добавок на гидратацию глиноземистого цемента // Техника и технология силикатов. – 2011. – Т. 18, № 4. – С. 12–15.
8. Киль П. Н., Крамар Л. Я., Кирсанова А. А. Добавки-ускорители полифункционального действия для шлакопортландцемента // Университетский комплекс как региональный центр образования, науки и культуры: Материалы Всеросс. науч.-метод. конф. – Оренбург: Оренбургский гос. ун-т, 2014. – С. 672–678.

## REFERENCES

1. Kouznetsova T. V. The main directions of improving the efficiency of production and use of cement. *Trudy MKhTI im. D. I. Mendeleeva*, 1985, no. 137, pp. 5–6 (in Russian).
2. Samchenko S. V., Vinogradov K. A. Utilization of galvanic sludges in cement production. *Tekhnika i tekhnologiya silikatov*, 2007, vol. 14, no. 4, pp. 27–29 (in Russian).
3. Krivoborodov Yu. R., Burlov A. Yu., Burlov I. Yu. Use of secondary resources to obtain cements. *Stroitel'nye materialy*, 2009, no. 2, pp. 44–45 (in Russian).
4. Samchenko S. V., Zorin D. A., Borisenkova I. V. Influence of dispersion alumina slag and sulfoaluminate clinker on the structure formation of cement stone. *Tekhnika i tekhnologiya silikatov*, 2011, vol. 18, no. 2, pp. 12–14 (in Russian).
5. Samchenko S. V., Zorin D. A. Slag cement with compensated shrinkage. *Stroitel'stvo-2008: Materialy Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. Rostov n/D: Rost. gos. stroit. un-t*, 2008, pp. 136–138 (in Russian).
6. Osokin A. P., Krivoborodov Yu. R., Samchenko S. V. *Tsementy s povyshennoy korrozionnoy stoykost'yu* [Cements with increased corrosion resistance]. Moscow: PKhTU im. D. I. Mendeleeva, 2002, 56 p (in Russian).
7. Krivoborodov Yu. R., Boyko A. A. The influence of mineral additives on hydration of alumina cement. *Tekhnika i tekhnologiya silikatov*, 2011, vol. 18, no. 4, pp. 12–15 (in Russian).
8. Kil' P. N., Kramar L. Ya., Kirsanova A. A. Additives-accelerators polyfunctional action for slag cement. *Universitetskiy kompleks kak regional'nyy tsentr obrazovaniya, nauki i kul'tury: Materialy Vseross. nauch.-metod. konf., Orenburg, Orenburgskiy gos. un-t*, 2014, pp. 672–678 (in Russian).

## ПРИГЛАШАЕМ К ДИСКУССИИ!

### ЗАКОНЫ ОБЪЕМНОЙ ПЕРИОДИЧНОСТИ В СТРОЕНИИ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ И АДАПТИВНОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

**Б. В. Гусев, Ю. А. Галушкин, Самуэл Иен-Лян Ин\*, А. А. Сперанский,**  
**Международная и Российская инженерные академии, г. Москва**  
**\* Международная и Российская инженерные академии,**  
**г. Москва, Национальный Тайваньский университет, Тайбэй, Тайвань**

**Ключевые слова:** вещество, энергия, информация, матрица законов строения физико-химических элементов, гомеостаз, конструкционные материалы и биоткани

**Key words:** substance, energy, information, matrix of the laws of structure of physical-chemical elements, homeostasis, construction materials and bio-tissues

#### Всеобщая триада знаний

За последние десятилетия получены многочисленные подтверждения устойчивой связи необъятного множества имеющихся в нашем распоряжении научных и технологических знаний с всеобщими законами устройства природы, общества и человека. Важнейшая роль в этой области естествознания отводится физике и химии, которые изучают наиболее общие фундаментальные закономерности, определяющие структуру и эволюцию материального мира, формы движения, а также универсальные взаимодействия в природе.

Рассмотрение исторической ретроспективы развития знаний свидетельствует о постоянном стремлении человека к познанию всеобщего (единого) закона эволюции взаимосвязи причины и следствия, порождающего единые природные механизмы движения материи через взаимное превращение вещества, энергии и их трансформацию с изменением состояний (рис. 1) [1].