ГРАНИЦА РАЗДЕЛА ФАЗ КОМПОЗИЦИЙ СТРОИТЕЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

INTERPHASE OF BUILDING COMPOSITIONS

¹Айзенштадт А.М., ²Соколова Ю.В., ³Дроздюк Т.А., ⁴Авдушева М.А.

¹Ayzenshtadt A.M., ²Sokolova Y.V., ³Drozdyuk T.A., ⁴Avdusheva M.A.

¹Доктор химических наук, профессор, заведующий кафедрой композиционных материалов и строительной экологии

САФУ имени М.В. Ломоносова, г. Архангельск, Россия

²Ассистент кафедры композиционных материалов и строительной экологии

САФУ имени М.В. Ломоносова, г. Архангельск, Россия

³Старший преподаватель кафедры композиционных материалов и строительной экологии

САФУ имени М.В. Ломоносова, г. Архангельск, Россия

⁴Ассистент кафедры инженерной геологии, оснований и фундаментов

САФУ имени М.В. Ломоносова, г. Архангельск, Россия

¹Doctor of chemical sciences, Professor, Head of the Department of the composite materials and environmental engineering

Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Arkhangelsk, Russia

²Assistant of the Department of the composite materials and environmental engineering

Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Arkhangelsk, Russia

³Senior Lecturer of the Department of the composite materials and environmental engineering

Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Arkhangelsk, Russia

⁴Assistant of the Department of the geotechnics;

Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Arkhangelsk, Russia

Аннотация. Целью данной работы является демонстрация нескольких методологических подходов к решению задач управления процессами трансформационных превращений вещества на границе раздела фаз макроповерхности и в дисперсных системах, которые можно, на наш взгляд, использовать в качестве критериев количественной характеристики одного из основополагающих законов научного направления «Геоника» – закона «Сродства структур». Предложенные подходы базируются на фундаментальных положениях физической и коллоидной химии, кристаллоэнергетики. В качестве данных критериев, позволяющих управлять структурообразованием на межфазной границе, предложены энергетическая интерпретация кинетической модели топохимического взаимодействия компонентов и значение аналоговой постоянной Гамакера. Разработаны методологические принципы экспериментального определения этих характеристик. Проведена апробация предложенных подходов на примере различных тонкодисперсных композиций: глиоксаль-кора, базальт-кора, базальт-полиминеральный кварцево-полевошпатовый песок и базальт-сапонит. Кроме того, коллоидно-химический подход к созданию суспензий на основе тонкодисперсных частиц горных пород, обладающих специфическими свойствами, позволяет синтезировать агрегативно устойчивые суспензии магнитных жидкостей. Приводятся примеры их использования в строительном материаловедении.

Abstract. This work aims to demonstrate several methodological approaches to solving problems of controlling the transformation processes of matter at the interface of the macro-surface and in dispersed systems, which, in our opinion, can be used as criteria for the quantitative characteristics of one of the fundamental laws of the scientific direction "Geonics" – the "Affinity of structures" law. The proposed approaches are based on the fundamental principles of physical and colloidal chemistry, crystal energy. The energy interpretation of the kinetic model of the topochemical interaction of the

components and the analog Hamaker constant value are proposed as these criteria make it possible to control the structure formation at the interface. We have developed the methodological principles for the experimental determination of these characteristics. We have tested the proposed approaches on various finely dispersed compositions: glyoxal-bark, basalt-bark, basalt-polymineral quartz-feldspar sand, and basalt-saponite. Besides, the colloidal-chemical approach to the creation of suspensions based on finely dispersed particles of rocks with specific properties makes it possible to synthesize aggregately stable suspensions of magnetic fluids. Examples of their use in building materials science are given.

Ключевые слова: закон сродства структур, кинетическая модель, поверхностное натяжение, константа скорости, постоянная Гамакера, дисперсные системы, агрегативная устойчивость, ферромагнитные жидкости.

Keywords: the affinity of structures law, kinetic model, surface tension, rate constant, Hamaker constant, dispersed systems, aggregate stability, ferromagnetic fluids.

Приоритетными направлениями исследований в отечественной и мировой научной практике, связанной со строительным материаловедением, являются создание инновационных материалов на основе нетрадиционного сырья (композиционных вяжущих; нано- и биоматериалов), рациональное природопользование, внедрение новых экологически чистых «зеленых» материалов, повторное использование природных и техногенных отходов (рециклинг). Реализация данных положений способствует повышению эффективности и сокращению стоимости производства материалов, уменьшению нагрузки на окружающую природную среду и созданию устойчивой системы «человек-материал-среда обитания» [1, 2]. В этом плане понятен интерес исследователей, проявляемый к новым химическим соединениям и подходам при формировании композиций строительного назначения [3]. Так, например, в качестве нетрадиционного связующего вещества представляет значительный интерес диальдегид с тривиальным названием глиоксаль (этандиаль $C_2H_2O_2$), синтезируемый путем окисления этиленгликоля [4-6]. Глиоксаль способен самопроизвольно образовывать полимерную структуру даже при отрицательных температурах. Продукт является одним из заменителей формальдегида, однако, в отличие от последнего, он относится к 3 классу опасности (вещества умеренно опасные), нетоксичный [7]. Нами в исследованиях [8, 9] установлена эффективность применения данного органического соединения в качестве связующего элемента для усиления несущей способности слабых грунтовых оснований инженерных коммуникаций, реактивного связующего компонента бесцементных грунтобетонов.

Другим примером получения экологически эффективных строительных материалов с использованием не традиционных компонентов являются теплоизоляционные композиты на основе базальтовых волокон и сапонит-содержащего связующего реагента [10, 11]. Использование данных сырьевых ресурсов позволяет получать материалы, сохраняющие свои теплофизические характеристики в широком влажностно-температурном интервале эксплуатации.

Работы, связанные с управляемым процессом минерализации древесной матрицы [12-14], позволили получать экологически чистые строительные материалы из растительного сырья с повышенными физико-механическими, теплофизическими и пожарно-техническими характеристиками, устойчивыми к окислительной деструкции.

Новым направлением исследований в плане создания уникальных систем, обладающих специфическими электромеханическими и магнитноиндукционными свойствами, является синтез магнитных жидкостей на основе коллоидно-дисперсных систем магнетита и изучение возможностей применения этих систем в индустрии строительных материалов [15, 16].

Достижение синергетического эффекта взаимодействия структурных элементов различного генезиса, состава и морфологии при получении композиций с показателями, превосходящими свойства исходных компонентов, возможно только с учетом взаимодействия между структурными элементами на границе раздела фаз, при котором образуются прочные связи (физической и/или химической природы) между элементами, характеризующимися физико-химическим сродством.

Основную роль в этих процессах играет поверхность дисперсных материалов, которая отличается от объемной фазы повышенным энергетическим потенциалом за счет наличия активных центров [17]. Исходя из этого, система управления процессами формирования качества строительных композитов должна базироваться на функциональной взаимосвязи между составом компонентов, их свойствами и характеристиками поверхности контакта. Поэтому одним из средств оптимизации состава разрабатываемого композита является соблюдение закона «Сродства структур» [18], количественным выражением которого могут являться критерии, определяемые на основе фундаментальных положений физической химии.

Целью данной работы является демонстрация нескольких методологических подходов к решению задач управления процессами трансформационных превращений вещества на границе раздела фаз макроповерхности и в дисперсных системах, которые можно, на наш взгляд, использовать в качестве таких критериев.

Первое. Кинетическая модель топохимического взаимодействия, учитывающая диффузионные и кинетические процессы на границе раздела фаз. Информационным критерием для создания такой модели, как показано в работе [19], является поверхностное натяжение (свободная поверхностная энергия единицы поверхности), возникающее на границе раздела дисперсная фаза – дисперсионная среда.

Математическое выражение для описания кинетики топохимических превращений получено, исходя из основных двух принципов: гетерогенные реакции, протекающие на границе раздела фаз, являются реакциями первого порядка [20, 21], и степень превращения активных центров поверхности (α) в таком процессе пропорциональна ее поверхностному натяжению (σ). Основное кинетическое уравнение топохимического процесса с учетом изменения поверхностной энергии будет иметь следующий вид:

$$\ln \frac{\sigma_1 - \sigma_t}{\sigma_0 - \sigma_1} = K(t - t_1) - \ln \frac{\sigma_0}{\sigma_1}, \quad 1)$$

где $K=kS$ и k – константа скорости твердофазного процесса; S – удельная поверхность твердой фазы; t – время взаимодействия.

Для реализации такого подхода необходимо выбрать начальный временной период t_1 (достижения времени окончания индукционного периода взаимодействия и выравнивания скоростей подвода и расходования вещества в результате химической реакции), что и будет соответствовать параметру σ_1 . Тангенс угла наклона функциональной зависимости

$$\ln \frac{\sigma_1 - \sigma_t}{\sigma_0 - \sigma_1} = f(t - t_1) \quad 2)$$

позволяет рассчитать константу скорости взаимодействия реагентов на поверхности раздела фаз при образовании искомой композиции. Сравнение абсолютных значений постоянной $k=K/S$ [19] для разных условий протекания реакции (или изменения реагирующих компонентов) может быть использовано для оценки сродства структур. Так, в работе [19] нами проведена апробация предлагаемой энергетической модели кинетического описания топохимических процессов на примере двух композиций, которые в качестве твердой фазы содержали измельченную до тонкодисперсного состояния кору сосны обыкновенной. Отличительной особенностью исследуемых композиций являлись составы добавляемых жидких фаз. В первом случае использовался водный раствор глиоксаля (K1), во втором – водная суспензия тонкодисперсного базальта (K2). Вторая композиция рассматривалась нами в качестве реакционной системы, исходя из исследований, проведенных в работе [22], где показано, что реакционные группы лигнина тонкоизмельченной коры связывают частицы базальта в процессе хемосорбционных явлений. Основным информационным параметром (учитывая, что поверхность твердой фазы участвует в топохимическом взаимодействии своими активными центрами) являлось значение поляризационной составляющей поверхностного натяжения (σ_s^p), определяемой по углу смачивания поверхности рабочими жидкостями и последующим расчетом искомой величины по методу «Оунса, Вендта, Рабеля и Кьельбле» (ОВРК) [23–28]. Удельную площадь поверхности тонкодисперсной коры и смеси «кора-базальт» для определения константы скорости реакции взаимодействия компонентов в исследуемых композициях измеряли сорбционным методом (метод БЭТ).

В результате проведенных экспериментов, в которых переменными параметрами были концентрационные соотношения компонентов взаимодействующих смесей, были получены следующие математические выражения для уравнения (2) (коэффициент достоверности $R=0,95\pm 0,03$):

$$\ln \frac{\sigma_1 - \sigma_t}{\sigma_0 - \sigma_1} = 3,0 \cdot 10^{-3} (t - t_1) + 0,33, \quad (3)$$

$$\ln \frac{\sigma_1 - \sigma_t}{\sigma_0 - \sigma_1} = 1,2 \cdot 10^{-2} (t - t_1) + 0,01, \quad (4)$$

Выражение (3) получено для К1, а (4) – для К2. Полученные математические модели позволили рассчитать константу скорости топохимического взаимодействия для исследуемых систем. Так, для К1 эта величина составила $2,69 \cdot 10^{-8}$ кг/(м²·мин), для К2 – $2,07 \cdot 10^{-9}$ кг/(м²·мин).

Полученные данные показывают, что константа скорости топохимической реакции взаимодействия глиоксаля с активными центрами механоактивированной коры больше, чем на порядок константы скорости взаимодействия в тонкодисперсной системе базальт-кора. Вместе с тем, с точки зрения химического состава и строения реагирующих объектов в К1 по сравнению с К2 сходство структур значительно выше, что и количественно подтверждают значения констант, определенные по предлагаемому методу.

Второе. Ключевым элементом данного метода проектирования композитов является установление величины константы ван-дер-ваальсовского взаимодействия [29]. Так, теория ДЛФО [30, 31] дает прямо пропорциональную взаимосвязь константы ван-дер-ваальсовского взаимодействия дисперсных частиц (A_B) с постоянной Гамакера (A):

$$A = \frac{\pi^2 N_A^2}{V_m} A_B, \quad (5)$$

где V_m – молярный объем; N_A – постоянная Авогадро.

Практическая реализация такого решения может быть связана с начальным этапом подбора сырьевых материалов, заключающимся в экспериментальном определении постоянной Гамакера композиции сырьевой смеси, сочетание компонентов в которой дает максимальную по значению величину A [32]. Так, если обозначить постоянную Гамакера композиции как A_{1-2} , а аналогичный параметр для, например, двух предполагаемых сырьевых компонентов A_1 и A_2 , то, исходя из [30], данный принцип будет реализовываться, исходя из следующего математического выражения:

$$A_{1-2} = \sqrt{A_1 A_2}. \quad (6)$$

В работах [29, 32] нами раскрыты методические особенности определения постоянной Гамакера для тонкодисперсных порошковых систем, однако, в связи с невозможностью в настоящее время преодолеть некоторые инструментальные сложности определения данного параметра, расчет позволяет судить об аналоговой величине данной постоянной (A_m). Так, для тонкодисперсной двухкомпонентной системы базальт-полиминеральный кварцево-полевошпатовый песок [33] рассчитаны постоянные A_{11} (порошок базальта) и A_{12} – порошок, в которых часть дисперсной фазы (1 – базальт) замещена тонкодисперсными частицами (2 – полиминеральный песок). Установлена функциональная взаимосвязь следующих величин: (A_{11}, A_{12}) = $f(C_n)$, которая хорошо описывается уравнением полинома второй степени и имеет следующее аналитическое выражение ($R^2=0,92$):

$$(A_{11}, A_{12}) = -10^{-23} C_n^2 + 8,15 \cdot 10^{-22} C_n + 7,38 \cdot 10^{-20}, \quad (7)$$

где C_n – содержание тонкодисперсного порошка песка, %.

Выражение (7) позволило рассчитать количественное содержание компонентов данной двухкомпонентной системы, которое характеризуется максимальным значением аналоговой постоянной Гамакера (наилучшему варианту соответствия закону «Сродства-структур»). В этом случае соотношение компонентов в тонкодисперсной системе равно: 59% порошок базальта и 41% порошок песка.

В [34] с целью определения оптимального состава минеральной защитной композиции для поверхности строительных материалов из древесины исследовалось дисперсионное взаи-

модействие тонкодисперсной смеси порошков базальта и сапонита. Установлено, что в зависимости от соотношения компонентов (от 0 до 100% по содержанию сапонита) постоянная Гамакера меняется в пределах $(0,60 \div 1,20) \cdot 10^{-20}$ Дж. Максимальное значение постоянная A на поверхности древесины принимает при соотношении компонентов смеси 90% базальт и 10% сапонит.

Новое направление исследований в строительном материаловедении связано с синтезом ферромагнитных жидкостей (МЖ). Первые МЖ были открыты еще в XX веке [35]. В настоящее время они получают все больше направлений использования. МЖ можно рассматривать как совокупность наноразмерных магнитов (тонкодисперсная твердая фаза), свободно перемещающихся в несущей жидкости. В исследованиях [15, 16, 36] показано, что, добываясь определенных размерных характеристик частиц магнетита, можно получить агрегативно устойчивую коллоидную систему, обладающую рядом свойств, присущих МЖ. В ходе проведенных исследований были созданы лабораторные установки для измерения величины электрического тока, отличающиеся конструкцией индукционной измерительной ячейки (рисунок 1). Результаты испытаний по определению силы тока подтвердили рабочую гипотезу о том, что суспензия, полученная на основе тонкодисперсного магнетита, способна становиться источником электрического тока, при условии ее механического перемещения в постоянном магнитном поле. Величина силы тока зависит от содержания дисперсной фазы в суспензии и от конструктивных параметров измерительной ячейки.

Рис. 1. Экспериментальная измерительная ячейка

Для определения величины переменного электрического тока была создана ячейка 1 (рисунок 1а). Суспензия помещалась в герметичный пластиковый цилиндр (1) диаметром 20 мм и высотой 40 мм. Вокруг цилиндра формировалась катушка (2) из изолированной медной проволоки диаметром 0,38 мм. Магнитное поле создавалось при помощи постоянного магнита (3), закрепленного поверх катушки. Концы проволоки зачищались и запаивались. Для испытаний использовались катушки с числом витков $n = 30, 60$ и 120 . С целью увеличения зоны воздействия магнитного поля была создана измерительная ячейка 2 (рисунок 1б), состоящая из двух герметичных цилиндрических емкостей (1), объединенных в катушку (2) из медной проволоки диаметром 0,38 мм и помещенных между двумя магнитами (3). Число витков на каждой емкости составило $n = 60$.

Результаты лабораторных экспериментов и полученные на их основе функциональные зависимости удельной электрической проводимости от частоты переменного тока показали, что введение водной суспензии на основе магнетита в состав растворной смеси приводит к увеличению электрической проводимости [37]. Получены математические модели, характеризующие данную взаимосвязь.

Установлено, что величина электропроводности растворной смеси линейно зависит от концентрации в ней тонкодисперсной добавки магнетита. Полученные результаты позволяют оптимизировать состав смеси и условия ее применения с учетом особенностей технологического процесса, реализующегося на конкретных строительных площадках, и предложить ряд способов технологического контроля [38, 39].

Предложенные подходы к выделению ключевых функций межфазного взаимодействия при формировании свойств строительных композитов базируются на фундаментальных поло-

жениях физической и коллоидной химии, кристаллоэнергетики. Данный факт позволяет выделить критерии количественной характеристики одного из основополагающих законов научного направления «Геоника» – закона «Сродства структур». В качестве данных критериев, позволяющих управлять структурообразованием на межфазной границе, перспективно использовать энергетическую интерпретацию кинетической модели топохимического взаимодействия компонентов и значение аналоговой постоянной Гамакера. Разработаны методологические принципы экспериментального определения этих характеристик. Кроме того, коллоидно-химический подход к созданию суспензий на основе тонкодисперсных частиц горных пород, обладающих специфическими свойствами, позволяет синтезировать агрегативно устойчивые суспензии магнитных жидкостей. Приводятся примеры их использования в строительном материаловедении.

Список использованной литературы

1. Лесовик В.С. Повышение эффективности производства строительных материалов с учетом генезиса горных пород: Научное издание. М.: Ассоциации строительных вузов, 2006. 526 с.
2. Лесовик В.С. Геоника. Предмет и задачи. Белгород: Изд. БГТУ, 2012. 213 с.
3. Королев Е.В. Перспективы развития строительного материаловедения // Academia. Архитектура и строительство. 2020. № 3. С. 143-159.
4. Vodyankina O.V., Mamontov G.V., Knyazev A.S. et al. Oxidation of ethylene glycol to glyoxal: from polycrystalline silver to nanostructured Ag/P₂O₅/SiO₂ catalyst // 7th World Congress on Oxidation Catalysis, June 9-12 2013. MO USA. St. Louis, 2013. P. 44.
5. Salaev M.A., Kokova D.A., Novikov D.V., Krejker A.A., Knyazev A.S., Vodyankina O.V., Kurina L.N., Menshchikova T.V. On the kinetics and regularities of ethylene glycol oxidation into glyoxal // XIX International Conference on Chemical Reactor «Chemreactor-19». Novosibirsk: Boreskov Institute of Catalysis, 2010. P. 309-310.
6. Vodyankina O., Knyazev A., Magaev O., Kreiker A., Salaev M., Malkov V., Stadnichenko A., Boronin A. New trends in design of catalysts for ethylene glycol oxidation into glyoxal // The 6-th world congress on oxidation catalysis. 2009. P. 130-131.
7. Колычев Н.М., Аржаков В.Н., Аржаков П.В., Серикбаев Р.Е., Кучкина М.А. Глиоксаль – дезинфектант широкого спектра антимикробного действия // Научный журнал КубГАУ. 2013. № 87(03). С. 1-10.
8. Gayda J., Ayzenshtadt A., Tutygin A., Frolova M. Organic-mineral aggregate for sandy subsoil strengthening // Procedia Engineering. 2016. Vol. 143. P. 90–97.
9. Sokolova Y.V., Ayzenshtadt A.M., Malkov V.S., Strokova V.V. Glyoxal and its derivatives for stabilization of aluminium silicate colloid-dispersed systems // Journal of Physics: Conference Series. 2018. Vol. 1135. 012109.
10. Дроздюк Т.А., Айзенштадт А.М., Фролова М.А., Рама Шанкер Верма. Минераловатный композит с использованием сапонит-содержащих отходов горнодобывающей промышленности // Строительные материалы и изделия. 2020. Том 3. № 3. С. 21-27.
11. Drozdyuk T., Ayzenshtadt A., Frolova M., Nosulya A. Thermal insulation composite with the use of mining waste // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 365. 032062.
12. Килыусева Н.В., Айзенштадт А.М., Данилов В.Е., Беляев А.О. Модификация древесины органоминеральным комплексом // Промышленное и гражданское строительство. 2020. № 2. С. 47-51.
13. Kilyusheva N.V., Danilov V.E., Ayzenshtadt A.M., Belyaev A.O. Compounding and technological methods for increasing the efficiency of wood matrix mineralization // Journal of Physics: Conference Series. 2020. Vol. 1697. 012242.
14. Ayzenshtadt A., Lesovik V., Frolova M., Tutygin A., Danilov V. Nanostructured wood mineral composite // Procedia Engineering. 2015. Vol. 117. P. 45-51.
15. Авдушева М.А., Айзенштадт А.М. Агрегативная устойчивость водных дисперсных систем на основе магнетита // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2019. № 1. С. 16-20.
16. Avdusheva M., Ayzenshtadt A., Strokova V., Danilov V. Possibility evaluation of using colloid-dispersed systems based on magnetite as an electric current source // Conference: 20th Interna-

- tional Multidisciplinary Scientific GeoConference Proceedings SGEM. 2020. No. 4.1. Vol. 20. P. 145-152.
17. Цао Гонжун, Ин Ван. Наноструктуры и наноматериалы. Синтез, свойства и применение / Пер. с англ. 2-го издания А.И. Ефимова, С.И. Каргов. М.: Изд. Научный мир, 2012. 520 с.
18. Лесовик В.С., Загороднюк Л.Х., Чулкова И.Л. Закон сродства структур в материаловедении // Фундаментальные исследования. 2014. № 3-2. С. 267-271.
19. Ayzenshtadt A.M., Sokolova Y.V., Danilov V.E., Frolova M.A. Energy interpretation of a kinetic model of topochemical reactions // Solid State Technology. 2020. Vol. 63. No. 6. P. 2530-2541.
20. Mihajlovic I., Strbac N., Zivkovic Z. Kinetic modelling of chalcocite particle oxidation // Scandinavian Journal of Metallurgy. 2004. 33(6). P. 316-321.
21. Стромберг А.Г. Физическая химия: учебник для вузов / А.Г. Стромберг, Д.П. Семченко; под ред. А.Г. Стромберга. 6-е изд., стер. М.: Высш. шк., 2006. 527 с.
22. Данилов В.Е., Айзенштадт А.М. Использование модифицированной древесной коры сосны обыкновенной в качестве засыпной теплозвукоизоляции // Лесн. журн. 2019. № 2. С. 111-118.
23. Яковец Н.В., Крутько Н.П., Опанасенко О.Н. Определение свободной поверхностной энергии порошкообразных смолисто-асфальтовых веществ методом Оуэнса-Вендта-Рабеля-Каелбле // Свиридовские чтения: сб. ст. Минск: Вып. 8. 2012. С. 253-260.
24. Ariawan D., Mohd Ishak Z.A., Salim M.S., Mat Taib R., Ahmad Thirmizir M.Z. Wettability and interfacial characterization of alkaline treated kenaf fiber-unsaturated polyester composites fabricated by resin transfer molding // Polymer Composites. 2017. 38(3). P. 507-515.
25. Encinas N., Pantoja M., Abenojar J., Martínez M.A. Control of wettability of polymers by surface roughness modification // Journal of Adhesion Science and Technology. 2010. 24(11-12). P. 1869-1883.
26. Karl C.W., Klüppel M. Characterization of elastomers by wetting: Roughness and chemical heterogeneity // Chemicke Listy 105(15 SPEC. ISSUE). 2011. P. s275-s276.
27. Данилов В.Е., Королев Е.В., Айзенштадт А.М. Измерение краевых углов смачивания порошков методом “sessile drop” // Физика и химия обработки материалов. 2020. № 6. С. 75-82.
28. Данилов В.Е., Королев Е.В., Айзенштадт А.М., Строкова В.В. Особенности расчета свободной энергии поверхности на основе модели межфазного взаимодействия Оунса-Вендта-Рабеля-Кьельбле // Строительные материалы. 2019. № 11. С. 66-72.
29. Айзенштадт А.М., Королев Е.В., Дроздюк Т.А., Данилов В.Е., Фролова М.А. Возможный подход к оценке дисперсионного взаимодействия в порошковых системах // Физика и химия обработки материалов. 2021. № 2 (в печати).
30. Дерягин Б.В., Чураев Н.В., Муллер В.М. Поверхностные силы. М.: Наука, 1985. 368 с.
31. Дерягин Б.В., Абрикосов Е.М., Лифшиц Е.М. Молекулярное притяжение конденсированных тел // Успехи физической химии. 2015. т. 185. № 9. С. 982-1001.
32. Ayzenshtadt A.M., Shinkaruk A.A., Frolova M.A. Possible criterion for evaluating the compatibility of components in the building mixtures // Lecture Notes in Civil Engineering. 2021. Vol. 95. P. 280-286.
33. Данилов В.Е., Айзенштадт А.М., Фролова М.А., Тутыгин А.С. Изменение поверхностной энергии - критерий оптимизации состава бесцементного композиционного вяжущего // Материаловедение. 2018. № 2. С. 39-44.
34. Айзенштадт А.М., Махова Т.А., Фролова М.А., Тутыгин А.С., Стенин А.А., Попова М.А. Проектирование состава нано- и микроструктурированных строительных композиционных материалов // Промышленное и гражданское строительство. 2012. № 10. С. 14-18.
35. Берковский Б.М., Медведев В.Ф., Краков М.С. Магнитные жидкости. М.: Химия, 1989. 240 с.
36. Новопашин С.А., Серебрякова М.А., Хмель С.Я. Методы синтеза магнитных жидкостей (обзор) // Теплофизика и аэромеханика. 2015. Том 2. № 4. С. 411-427.
37. Авдушева М.А., Невзоров А.Л. Влияние магнетита на электропроводность растворной смеси // Строительные материалы. 2017. № 11. С. 55-58.

38. Патент № 2642760 Российская Федерация, МПК E02D33/00. Способ выявления и устранения дефектов изготавливаемой в грунте сваи: № 2017112617: заявл. 12.04.2017: опубл. 25.01.2018 / Авдушева М.А., Невзоров А.Л., Айзенштадт А.М.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова» (САФУ). Бюл. № 3 – 7 с.

39. Патент № 2642762 Российская Федерация, МПК E02D 27/08. Способ усиления фундамента: № 2017107922: заявл. 10.03.2017: опубл. 25.01.2018 / Авдушева М.А., Невзоров А.Л., Айзенштадт А.М.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова» (САФУ). Бюл. № 3 – 4 с.