



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2025-2-23-28>
УДК 621.745

Поступила 06.05.2025
Received 06.05.2025

ФОРМИРОВАНИЕ ПРОЧНОСТИ ПЕСЧАНО–ГЛИНИСТЫХ СМЕСЕЙ

С. А. КУЛИКОВ, ОАО «Минский тракторный завод»,
г. Минск, Беларусь, ул. Долгобродская, 29. E-mail: s.kulikov@mtz.by, cyberlis@mail.ru
Ю. А. КУЛИКОВ, ОАО «УКХ «Минский моторный завод»,
г. Минск, Беларусь, ул. Ваупшасова, 4. E-mail: ogmet.mmz@gmail.com

Рассмотрены различные факторы, способные влиять на формирование прочности песчано-глинистых смесей, например, гранулометрический состав огнеупорной основы, влажность, качество глины. Указано, что прочность смеси при сжатии и прочность на разрыв отражают различные свойства и их нельзя отождествлять. Прочность при сжатии сырых образцов показывает способность комплекса огнеупорный наполнитель – вода – связующее к уплотнению, прочность при растяжении – качество связующего, прочность в зоне конденсации влаги – способность смеси обеспечивать чистоту литых поверхностей.

Ключевые слова. Глина, смесь, прочность, синтез, качество.

Для цитирования. Куликов, С. А. Формирование прочности песчано-глинистых смесей / С. А. Куликов, Ю. А. Куликов // Литье и металлургия. 2025. № 2. С. 23–28. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2025-2-23-28>.

STRENGTH FORMATION OF CLAY–BONDED SAND MIXTURES

S. A. KULIKOV, OJSC “Minsk Tractor Works”, Minsk, Belarus, 29, Dolgobrodskaya str.
E-mail: s.kulikov@mtz.by, cyberlis@mail.ru
Yu. A. KULIKOV, OJSC “Minsk Motor Plant” Holding Managing Company”, Minsk, Belarus, 4, Vaupshasova str.
E-mail: ogmet.mmz@gmail.com

This paper examines various factors influencing the strength development of clay-bonded sand mixtures. The strength of the mixture depends on the granulometric composition of the refractory base, moisture content, and the quality of the clay. It is emphasized that compressive and tensile strength reflect different aspects of mixture behavior and should not be treated as equivalent. The compressive strength of green specimens indicates the ability of the refractory filler–water–binder system to compact, while tensile strength characterizes the quality of the binder. The strength in the moisture condensation zone reflects the mixture’s ability to produce clean casting surfaces.

Keywords. Clay, mixture, strength, synthesis, quality.

For citation. Kulikov S. A., Kulikov Yu. A. Strength formation of clay-bonded sand mixtures. Foundry production and metallurgy, 2025, no. 2, pp. 23–28. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2025-2-23-28>.

Введение

Формовочные и стержневые смеси являются специальными, т. е. позволяют получать качественную продукцию только при условии соответствия технологических параметров определенным значениям. Эти параметры могут отличаться не только от предприятия к предприятию, но и в отдельном цехе от участка к участку. Основными параметрами песчано-глинистых смесей (ПГС), подлежащих контролю в производстве, являются прочность при сжатии по сырому, влажность, газопроницаемость, прочность при разрыве в зоне конденсации влаги (ПЗКВ), количество глинистой составляющей, содержание активной глины и т. д. К сожалению, на множестве литейных производств СНГ контроль ПГС ограничивается только прочностью при сжатии и влажностью, все остальные параметры контролируются лишь при наличии необходимого оборудования. Ранее в [1] рассмотрены критерии оценки эффективности бентонитов и отмечено, что наиболее важным параметром ПГС с бентонитом является ПЗКВ. Для определения оптимального сочетания параметров технологического процесса получения литых изделий необходимо знать принципы формирования (синтез) прочности ПГС.

Влажность ПГС – важнейший параметр для синтеза прочности. В минералах вода может быть химически связанной с ними, этот тип воды называют конституционным и кристаллизационным. При потере

конституционной воды минерал необратимо теряет свои свойства и переходит в новое состояние. Так, при выгорании глина из связующего вещества переходит в балласт – шамотизируется. Кристаллизационная вода может при сушке удаляться из минерала, а при повторном увлажнении возвращаться в его состав. Если же вода химически не связана с минералом и свободно проникает в межкристаллические плоскости и выходит из них, ее называют цеолитной [2]. Таким образом, основной вклад в формирование прочности глины при увлажнении происходит от кристаллизационной и цеолитной воды.

ПГС состоят из огнеупорного наполнителя (формовочного кварцевого песка), глины, воды и технологических добавок. Сами по себе формовочные пески уплотняются плохо, и определяющим фактором при этом является гранулометрический состав. При введении в песок глины и воды уплотняемость возрастает. Причем сам процесс уплотнения с увеличением усилия сжатия протекает в три стадии: на первой сминается рыхлая ажурная структура дисперсной системы; на второй смесь перестраивается, формируя новый дальний порядок; на третьей система увеличивает плотность с изменением дальнего порядка [3], т. е. прочность смеси при сжатии – это интерпретация сил трения и расклинивающего действия зерновой основы, связующее же влияет на темп набора прочности. Об этом также свидетельствует характер изменения упругих свойств смеси [4]. Напротив, параметрические модели прочности при растяжении [5, 6] отдают ведущую роль именно связующему и характеру его взаимодействия с огнеупорной основой. Таким образом, показатели прочности ПГС при сжатии и при разрыве отражают разные свойства компонентов смеси. Их отдельное рассмотрение может исказить интерпретацию показателей качества и привести к браку литья.

Известно, что при меньшей влажности бентонитовые смеси показывают большую прочность по сравнению с каолиновыми глинами. Американские исследователи в 1945 г. выдвинули гипотезу, что это связано с тем, что крупные пакеты каолина неравномерно распределяются по зернам кварца. Бентонитовые чешуйки, напротив, очень малы и равномерно распределяются по зерну. Тем самым в ПГС с бентонитом отсутствуют зоны ослабления контактов – участки контакта зерен кварца без пленок связующего. Но в 1960-х гг. немецкие ученые пришли к выводу, что характер распределения связующего второстепенен, главенствующими являются физико-химические свойства связующих. Данные электронной микроскопии подтвердили, что в смеси характер распределения бентонита и каолина по зернам кварца одинаков, отличие лишь в толщине слоя глины. У бентонитов он значительно тоньше, что связано с расходом связующего в смеси [7].

Влияние температуры расплава на изменение прочности смеси очень велико. Как уже сказано выше, наиболее важная характеристика ПГС с бентонитом – ПЗКВ проявляется при нагреве поверхностных слоев формы при заливке. Эта характеристика важна в первую очередь для борьбы с ужиной. Данные различных экспериментов показывают, что все виды ПГС склонны к образованию ужимин, вопрос лишь во времени их формирования [8, 9]. Другими словами, какой бы качественной ни была глина в смеси, ужимина образуется, если чрезмерное время заливки формы позволяет излучению зеркала расплава высушить смесь и тем самым снизить ее прочность.

Необходимо уточнить, что подразумевается под термином «зона конденсации влаги». В строительстве широко известно понятие «точка росы» – температура, при которой влага атмосферного воздуха из парообразного состояния переходит в жидкость и конденсируется в виде капель воды на различных поверхностях [10]. Ввиду продолжительности процесса, простоты и точности измерений показателей расчет точки росы не вызывает каких-либо затруднений. В противоположность этому зона конденсации в ПГС – это явления, протекающие в приповерхностном слое смеси толщиной не более 9–10 мм. Сам процесс в зависимости от параметров смеси, температуры расплава и конфигурации формы занимает не более 1 мин. Скоротечность процесса и влияние целого спектра различных факторов значительно затрудняют доработку теории ПЗКВ. В общем случае авторы работ на тему ПЗКВ отмечают, что поверхностный слой смеси (до 10 мм) под действием теплоты расплава разделяется на несколько зон (от поверхности отливки вглубь формы): 1) зона пересохшей смеси с нулевой влажностью и температурой более 100 °С; 2) зона интенсивного парообразования с температурой около 100 °С с влажностью от нуля до первоначального значения; 3) зона максимального увлажнения (зона конденсации влаги) с температурой менее 100 °С и влажностью выше исходного значения; 4) зона с влажностью и температурой около первоначальных значений. Миграция зоны интенсивного парообразования практически совпадает с движением зоны конденсации влаги. Разрушение смеси происходит на границе зон парообразования и конденсации. Из этого вытекает, что возникновение градиента какого-либо показателя губительно сказывается на показателе ПЗКВ.

Данная работа направлена на уточнение влияния различных технологических факторов на прочностные свойства ПГС.

Методика проведения экспериментов

ПГС приготавливали в лабораторном катковом смесителе емкостью 5 кг из кварцевого песка Гомельского месторождения марки $1K_1O_3025$ (ГОСТ 2138-91), бентонитовой глины (порошок) марки П1Т₁А (ГОСТ 28177-89) Асканского месторождения (Грузия) и дистиллированной воды. Лабораторные образцы изготавливали путем уплотнения тремя ударами лабораторного копра модели 5033А (Россия). Испытания на прочность проводили на лабораторном приборе марки LRu-2e (MULTISERW-Morek, Польша), ПЗКВ определяли на приборе модели 5213М (Украина).

Результаты экспериментов и их обсуждение

Для уточнения влияния компонентов ПГС на показатели прочности изготовлены технологические пробы по рецептурам, приведенным в таблице, порядок приготовления смеси – по ГОСТ 28177-89. Изменение свойств смесей показано на рис. 1.

Рецептуры смесей с бентонитом

Компонент смеси	Содержание, %			
	смесь 1	смесь 2	смесь 3	смесь 4
Песок	95,0	95,0	93,4	93,4
Бентонит	5,0	5,0	6,6	6,6
Вода (сверх 100%)	2,3	3,3	3,3	4,9



Рис. 1. Изменение прочности образцов ПГС

Как видно из рис. 1, бентонит Асканского месторождения позволяет получать высокие значения качественных показателей смеси без увеличения дозировок каких-либо компонентов, что связано с физико-химическими свойствами этой глины. В СССР бентониты Асканского месторождения называли аскангелем, подчеркивая особенно высокие характеристики материала [11]. Напомним, что ПГС, согласно ГОСТ 28177-89, приготавливается в следующем порядке. Сначала в смеситель загружают песок и бентонит и перемешивают 1–2 мин. После этого добавляют 65–70 см³ воды, перемешивают смесь 20 мин при закрытой крышке смесителя. Затем отбирают первый образец смеси и проверяют на уплотняемость и прочность при сжатии. Далее образец возвращают в смеситель, смесь перемешивают еще 1–2 мин с открытой крышкой, после чего отбирают образец для анализа. Операции повторяют до падения прочности смеси. Таким образом проверяют качество бентонита в условиях естественного подсыхания. Из рис. 2 видно, что смесь по стандартной рецептуре при подсыхании выдерживает отбор лишь четырех образцов. Увеличение влажности позволило повысить первоначальный показатель уплотняемости и увеличить количество образцов до восьми. Однако простое увеличение влажности само по себе не дает прироста прочности, так как связующим в ПГС является бентонит. Для повышения прочности смеси необходимо увеличить содержание связующего, причем это касается как прочности при сжатии, так и ПЗКВ.

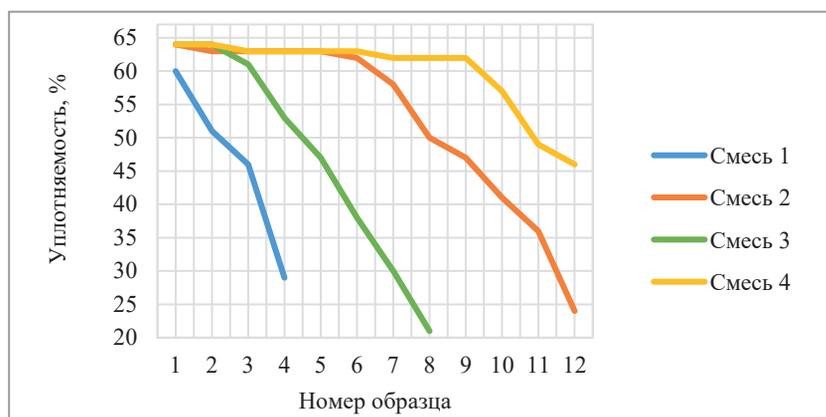


Рис. 2. Уплотняемость смесей

Для уточнения влияния влажности на комплекс уплотняемость – прочность при сжатии приготовлена смесь 1 по рецептуре, приведенной в таблице, с отличием в количестве добавляемой воды. Изначально в смесь вводили 30 см^3 воды (40% от стандартного количества для пробы по ГОСТ 28177-89) и после 20 мин перемешивания отбирали образцы с интервалом 1–2 мин, после каждого отбора добавляли еще 10 см^3 воды вплоть до влажности 4,5%. Результаты эксперимента показаны на рис. 3.

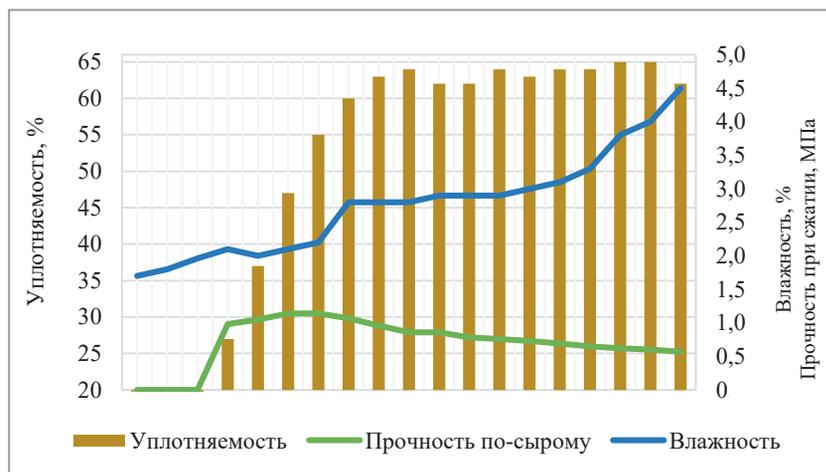


Рис. 3. Свойства ПГС при недостаточном увлажнении

Из рисунка видно, что при недостаточном увлажнении не достигаются показатели прочности и степени уплотняемости. Обращает на себя внимание тот факт, что при показателе уплотняемости 27% (по ГОСТ 28177-89 значение должно быть не менее 60%) достигается прочность 0,98 МПа, достаточная для отнесения бентонита к наивысшей группе П1. При уплотняемости 55% достигается максимум 1,14 МПа и начинает медленно снижаться. Это связано с тем, что при недостаточной увлажненности бентонит поглощает всю доступную влагу, формируя высокий показатель прочности. Отсутствие свободной влаги приводит к значительному внутреннему трению, повышая работу уплотнения. После поглощения всей необходимой для максимальной прочности влаги она, вытесняясь по границам зерна, снижает трение и ослабляет манжеты контактов связующего. Последнее и проявляется в увеличении уплотняемости и снижении прочности. На рис. 3 для упрощения отсутствует показатель ПЗКВ, однако эта характеристика также чувствительна к содержанию влаги в смеси. При недостаточном увлажнении смесь показывает ПЗКВ, равную 2,2 кПа, что недостаточно для отнесения бентонита к марке П1Т₁А (ГОСТ 28177-89). С ростом влажности происходит увеличение ПЗКВ, и при влажности 2,8% он достигает максимума 3,2 кПа. Увеличение влаги с 2,8 до 4,5% не дает ощутимого изменения ПЗКВ.

Недостаточная увлажненность смеси может быть обусловлена не только естественным подсыханием, но и введением различных добавок, интенсивно впитывающих влагу. К их числу относится крахмалит – продукт, получаемый экструзией природного крахмала. Последний состоит из наружной (амилопектин) и внутренней (амилоза) оболочек. Амилопектин плохо набухает в холодной воде, амилоза – легко. В процессе экструзии получают продукт, используемый в литейном производстве, – крахмалит,

легко набухающий в холодной воде [12]. Введение крахмалита снижает работу уплотнения, и степень уплотняемости смеси повышается при сохранении усилия прессования [13]. Однако, как показано выше, прочность при сжатии и на разрыв отражают разные качественные показатели связующего. Для иллюстрации этого рассмотрим влияние крахмалита на прочность ПГС. Смесь приготавливали по рецептуре (см. таблицу, смесь 1) с добавкой вместе с сухими компонентами 1 мас. % крахмалита (рис. 4).

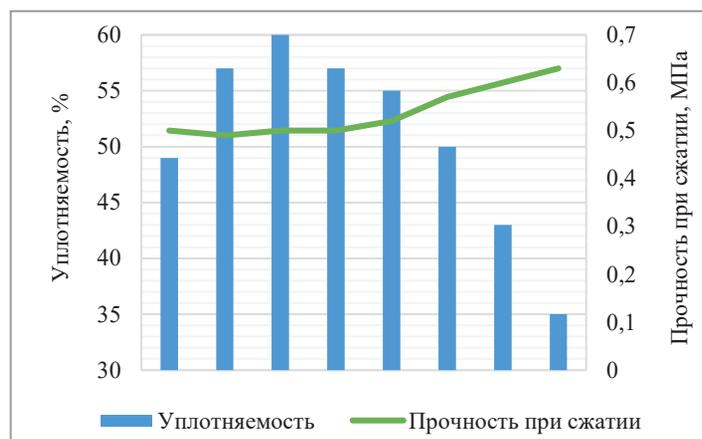


Рис. 4. Свойства смеси с крахмалитом

Сравнение свойств смесей (рис. 1, 4) показывает, что добавка крахмалита проявляется в виде падения уплотняемости и снижения максимального показателя прочности. Для достижения необходимого показателя уплотняемости 60% введено дополнительное количество воды – 30 см³. Даже после этого прочность при сжатии составила не более 55% от максимальной прочности смеси 1 (см. рис. 1). ПЗКВ смеси с крахмалитом составила 1,5 кПа, что на 49% меньше этого показателя для смеси 1. Таким образом, введение крахмалита, интенсивно поглощающего воду, аналогично недостаточной увлажненности смеси. Частицы крахмала набухают и раздвигают частицы смеси, снижая работу уплотнения. Но так как для этого требуется влага, крахмал впитывает ее, снижая количество влаги, взаимодействующей с бентонитом. Недостаток влаги приводит к понижению вяжущей способности связующего. Поэтому введение любой добавки в ПГС должно проводиться с учетом рецептуры смеси и обеспечения требуемых характеристик.

Выводы

1. Прочность ПГС при сжатии сырых образцов отражает способность комплекса огнеупорный наполнитель – вода – связующее к перегруппировке и уплотнению, прочность при растяжении – качество связующего, ПЗКВ – способность комплекса огнеупорный наполнитель – связующее сохранять прочность при повышении температуры и тем самым обеспечивать качество литых поверхностей. Поэтому изучение вопросов формирования прочности ПГС необходимо рассматривать с учетом различных технологических факторов. Наличие в литейных лабораториях предприятий приборов контроля прочности всех типов не желательно, а строго обязательно.

2. Для обеспечения необходимых показателей прочности следует соблюдать ряд рекомендаций:

- прочность при сжатии повышается при увеличении влажности, количества связующего вещества и обеспечении необходимого гранулометрического состава;
- прочность при растяжении обеспечивается качеством связующего и его количеством;
- прочность в зоне конденсации влаги зависит от качества связующего и равномерности свойств смеси по сечению;
- количество влаги в ПГС должно быть минимальным, но достаточным для взаимодействия со связующим и остальными компонентами смеси.

ЛИТЕРАТУРА

1. Куликов, С.А. Критерии оценки эффективности бентонитов при производстве отливок ответственного назначения / С.А. Куликов, Ф.И. Рудницкий, В.А. Шумигой // Литье и металлургия. – 2023. – № 4. – С. 43–47.
2. Кукуй, Д.М. Теория и технология литейного производства: в 2 ч. Ч. 1. Формовочные материалы и смеси / Д.М. Кукуй, В.А. Скворцов, Н.В. Андрианов. – Минск: Новое знание, 2011. – 384 с.
3. Уплотнение сухого песка и песчано-глинистых смесей / А.А. Степанов [и др.] // Литейное производство. – 1970. – № 10. – С. 25–27.

4. Мутилов, В. Н. Упругие свойства формовочной смеси / В. Н. Мутилов // Литейное производство. – 1974. – № 1. – С. 30–31.
5. Уваров, А. В. Математическая модель прочности на разрыв формовочных смесей / А. В. Уваров, Е. Д. Боголепов // Отчет МАМИ / науч. рук. темы Г. М. Орлов. – М., 1985. – 53 с.
6. Жуковский, С. С. Прочность литейной формы / С. С. Жуковский. – М.: Машиностроение, 1989. – 288 с.
7. Boenisch, D. Die Bedeutung der Struktur intergranularer Binderrucken / D. Boenisch, W.-G. Burchard // Giesserei. – 1973. – № 17. – S. 516–524.
8. Hrbek, A. Zone de recondensation / A. Hrbek, F. Havlicek, L. Jenicek // 34e Congr. internat. fonderie. – Paris, 1967. – 16 p.
9. Untersuchung der die Schulpneigung beeinflussenden Vorgänge in der Kondensationszone tongebundener Försande / M. Gawlikowska [et al.] // Giesserei-Forsch. – 1982. – № 4. – S. 147–152.
10. Леонович, И. И. Дорожная климатология: учебник / И. И. Леонович. – Минск: БНТУ, 2005. – 485 с.
11. Мерабишвили, М. С. Бентонитовые глины / М. С. Мерабишвили. – М.: ГОСГЕОЛТЕХИЗДАТ, 1962. – 129 с.
12. Grodzinskiy, Z. Nowe spoivo skrobiowe Formamyl / Z. Grodzinskiy, T. Rzepa // Prz. adlew. – 1973. – № 8–9. – P. 255–258.
13. Cattanello, R. Terre sintetiche e plastificanti / R. Cattanello, R. Clementi // Fonderia ital. – 1961. – № 10. – P. 409–411.

REFERENCES

1. Kulikov S.A., Rudnitsky F.I., Shumigay V.A. Kriterii ocenki jeffektivnosti bentonitov pri proizvodstve otlivok otvetstvenno-go naznachenija [Criteria for evaluating the effectiveness of bentonites in the production of custom castings]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2023, no. 4, pp. 43–47.
2. Kukuj D.M., Skvorcov V.A., Andrianov N.V. *Teorija i tehnologija litejnogo proizvodstva. Formovochnye materialy i smesi* [Theory and technology of foundry production. Molding materials and mixtures]. Minsk, Novoe znanie Publ., 2011, 384 p.
3. Stepanov A.A., Kornjushkin O.A., Guljaev B.B., Abramov N.P. Uplotnenie suhogo peska i peschano-glinistyh smesey [Compaction of dry sand and sand-clay mixtures]. *Litejnoe proizvodstvo = Foundry production*, 1970, no. 10, pp. 25–27.
4. Mutilov V.N. Uprugie svojstva formovochnoj smesi [Elastic properties of molding mixture]. *Litejnoe proizvodstvo = Foundry production*, 1974, no. 1, pp. 30–31.
5. Uvarov A.V., Bogolepov E.D. Matematicheskaja model' prochnosti na razryv formovochnyh smesey [Mathematical model of tensile strength of molding mixtures]. *Otchet MAMI = MAMI report*, 1985, 53 p.
6. Zhukovskij S.S. *Prochnost' litejnoj formy* [Strength of the casting mold]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1989, 288 p.
7. Boenisch D., Burchard W.-G. Die Bedeutung der Struktur intergranularer Binderrucken. *Giesserei*, 1973, no. 17, ss. 516–524.
8. Hrbek A., Havlicek F., Jenicek L. Zone de recondensation. *34e Congr. internat. fonderie*. Paris, 1967, 16 p.
9. Gawlikowska M. [et al.] Untersuchung der die Schulpneigung beeinflussenden Vorgänge in der Kondensationszone tongebundener Försande. *Giesserei-Forsch.*, 1982, no. 4, pp. 147–152.
10. Leonovich I.I. *Dorozhnaja klimatologija* [Road climatology]. Minsk, BNTU Publ., 2005, 485 p.
11. Merabishvili M.S. *Bentonitovye gliny* [Bentonite clays]. Moscow, GOSGEOLTEHIZDAT Publ., 1962, 129 p.
12. Grodzinskiy Z., Rzepa T. Nowe spoivo skrobiowe Formamyl. *Prz. adlew.*, 1973, no. 8–9, pp. 255–258.
13. Cattanello R., Clementi R. Terre sintetiche e plastificanti. *Fonderia ital.*, 1961, no. 10, pp. 409–411.