

Известия вузов. Строительство. 2021. № 11. С. 64–72.

ISSN 0536-1052

News of Higher Educational Institutions. Construction. 2021; (11): 64–72.

ISSN 0536-1052

Научная статья

УДК 691.327

DOI: 10.32683/0536-1052-2021-755-11-64-72

СПОСОБ ПОДБОРА ОПТИМАЛЬНОГО СОСТАВА МЕЛКОЗЕРНИСТОГО СТАЛЕФИБРОШЛАКОПЕМЗОБЕТОНА

**Маргарита Александровна Гончарова, Николай Николаевич Черноусов,
Виктория Андреевна Стурова, Алена Андреевна Ливенцева**
Липецкий государственный технический университет, Липецк, Россия

Аннотация. Описан способ оптимизации состава мелкозернистого фиброшлакобетона со стальной фиброй, который позволяет получать более экономичные по расходу цемента составы бетонов, при этом сокращаются трудовые и материальные затраты по нахождению рационального соотношения компонентов. Приводятся уравнения для нахождения оптимального состава бетона, решение которых невозможно из-за большого количества неизвестных. Однако далее в статье описаны рекомендации и зависимости, путем решения которых могут быть найдены некоторые величины, и таким образом возможно будет рассчитать состав.

Ключевые слова: фибробетон, сталефиброшлакобетон, стальная фибра, удобоукладываемость

Для цитирования: Гончарова М.А., Черноусов Н.Н., Стурова В.А., Ливенцева А.А. Способ подбора оптимального состава мелкозернистого сталефиброшлакопемзобетона // Известия вузов. Строительство. 2021. № 11. С. 64–72. DOI: 10.32683/0536-1052-2021-755-11-64-72.

Original article

METHOD FOR SELECTING THE OPTIMAL COMPOSITION OF FINE-GRAINED STEEL-FIBER-SLASH PUM-CONCRETE

**Margarita A. Goncharova, Nikolay N. Chernousov, Viktoriya A. Sturova,
Alena A. Liventseva**
Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia

Abstract. The paper describes method for optimizing the composition of fine-grained fiber-slag concrete with steel fiber, which makes it possible to obtain concrete compositions that are more economical in terms of cement consumption, while reducing labor and material costs for finding a rational ratio of components. Equations are given for finding the optimal composition of concrete, the solution of which is impossible due to the large number of unknowns. However, further in the article, recommendations and dependencies are described by solving which some values can be found, and thus it will be possible to calculate the composition.

Keywords: fiber concrete, steel fiber slag concrete, steel fiber, workability

For citation: Goncharova M.A., Chernousov N.N., Sturova V.A., Liventseva A.A. Method for selecting the optimal composition of fine-grained steel-fiber-slash

pum-concrete. *News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2021; (11): 64–72. (In Russ.). DOI: 10.32683/0536-1052-2021-755-11-64-72.

Введение. XXI в. ставит перед собой новые задачи во всех областях промышленности. В частности, вопрос о поиске новых материалов, применяемых в промышленных технологиях, строительстве, металлургии, машиностроении и т.д., становится весьма актуальным. Один из таких материалов – сталефиброшлакобетон с различными добавками.

Используемая в современной практике методика определения состава различных бетонов является достаточно трудоемкой из-за необходимости проведения значительного количества опытных замесов¹⁻³. Это приводит к перерасходу вяжущего, удорожанию бетона и выполнению достаточно трудоемких работ в строительных лабораториях по расчету и приготовлению пробных замесов.

В настоящее время существует ряд теоретических положений о расчете и подборе состава сталефибробетона⁴⁻⁶, но в них, к сожалению, не описан порядок вычисления с различными добавками в зависимости от всех перечисленных факторов: количества, геометрических размеров и форм стальных фибр. Очевидно, что эти факторы оказывают также значительное влияние на свойства бетонной смеси и бетона.

Исследования показали, что фибробетонные смеси и бетоны одинаково качества могут быть получены при различных сочетаниях фибр и заполнителей и, следовательно, при разных количествах вяжущего [1]. Достижение же минимума расхода цемента является при существующей методике подбора состава бетона длительной, трудоемкой и продолжительной операцией и обычно до конца не доводится. Это и приводит к нерациональному использованию вяжущего, что показывает актуальность затронутой темы.

Цель работы – найти оптимальное соотношение между компонентами бетона, которое обеспечит заданные его свойства при минимальном расходе цемента.

Расчетные уравнения. Большинство способов оптимизации базируется на методе абсолютных объемов, который положен в основу излагаемой методики.

Для подсчета расхода материалов на замес приняты следующие зависимости:

$$V + \frac{Ц}{\rho_{ц}} + \frac{Д}{\rho_{д}} + \frac{П}{\rho_{п}} + \frac{Ф}{\rho_{ф}} + V_{в} = V_{б}, \quad (1)$$

¹ ГОСТ 29167–91. Бетоны. Методы определения характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении.

² СП 63.13330.2012. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 52-01–2003. М., 2015. 162 с.

³ Пособие по расчету бетонных и железобетонных конструкций на ЭВМ (к СП 63.13330.2012). М., 2013. 244 с.

⁴ СП 52-104–2006*. Сталефибробетонные конструкции. М., 2010. 63 с.

⁵ СП 360.1325800.2017. Конструкции сталефибробетонные. Правила проектирования. М., 2018. 70 с.

⁶ Рекомендации по проектированию и изготовлению сталефибробетонных конструкций / НИИЖБ, ЛенЗНИИЭП, ЦНИИпромзданий. М., 1987. 148 с.

где V , Π , D , Π , Φ – масса воды, цемента, тонкомолотой шлакопемзовой добавки, пемзового песка, фибры соответственно, кг;

$\rho_{\text{ц}}$, $\rho_{\text{д}}$, $\rho_{\text{п}}$, $\rho_{\text{ф}}$ – плотность цемента, тонкомолотой шлакопемзовой добавки, пемзового песка, фибры соответственно, кг/м³;

$V_{\text{в}}$, $V_{\text{г}}$ – объем воздуха в уплотненной бетонной смеси, бетона, м³.

$$V + \frac{\Pi}{\rho_{\text{ц}}} + \frac{D}{\rho_{\text{д}}} + V_{\text{в}} = V_{\text{цт}} V_{\text{з}}^{\text{п}} \frac{\Pi + \Phi}{\rho_{\text{з}}^{\text{ср}}}, \quad (2)$$

где V , Π , D , Π , Φ – масса воды, цемента, тонкомолотой шлакопемзовой добавки, пемзового песка, фибры соответственно, кг;

$\rho_{\text{ц}}$, $\rho_{\text{д}}$ – плотность цемента и тонкомолотой шлакопемзовой добавки соответственно, кг/м³;

$\rho_{\text{з}}^{\text{ср}}$ – средняя плотность заполнителя, кг/м³;

$V_{\text{в}}$, $V_{\text{цт}}$, $V_{\text{з}}^{\text{п}}$ – объем воздуха в уплотненной бетонной смеси, цементного теста и пустот в заполнителе цементного теста, м³.

Согласно уравнению (1), объем бетона равен сумме абсолютных объемов всех составляющих (с учетом вовлеченного воздуха).

Уравнение (2) дополняет первое и показывает, что в плотном бетоне объем цементного теста должен быть не менее объема пустот в заполнителе ($V_{\text{цт}} \geq 1$).

В предложенных уравнениях задача нахождения оптимального состава бетона является неопределенной, так как там присутствуют семь неизвестных. Если же будут заданы или каким-либо приемом найдены любые пять величин, то состав бетона может быть рассчитан. Решение этой задачи облегчается при учете следующих основных закономерностей, характерных для мелкозернистого шлакопемзобетона.

1. Консистенция (удобоукладываемость) смеси при выбранных материалах для бетона определяется в основном содержанием воды в ней и почти не зависит от расхода цемента. Следовательно, чем меньше воды в бетонной смеси, тем она жестче. На основании опытных данных выведены следующие формулы водопотребности смеси матрицы:

$$\begin{aligned} \text{а) } V_{\text{с}} &= 260 - 3,5 \text{ Ж, при } 5 \text{ с} \leq \text{Ж} \leq 10 \text{ с;} \\ \text{б) } V_{\text{с}} &= 245 - 1,7 \text{ Ж, при } 10 \text{ с} \leq \text{Ж} \leq 20 \text{ с;} \\ \text{в) } V_{\text{с}} &= 240 - 0,8 \text{ Ж, при } 20 \text{ с} \leq \text{Ж} \leq 30 \text{ с;} \\ \text{г) } V_{\text{с}} &= 220 - 0,14 \text{ Ж, при } \text{Ж} > 30 \text{ с,} \end{aligned} \quad (3)$$

где Ж – жесткость смеси по ГОСТ 10181–2014. Смеси бетонные. Методы испытаний.

Таким образом, в общем случае можно считать, что

$$V = f(\text{Ж}). \quad (4)$$

Формулы (3) и (4) выведены на основании математической обработки опытных данных.

Методика испытаний. По жесткости, подвижности и применяемому формовочному оборудованию сталефибробетонные смеси условно могут быть разделены на пять групп (таблица).

Группа	Марка по удобоукладываемости (ГОСТ 7473–2010. Смеси бетонные. Технические условия)	Подвижность смеси (матрицы), см	Жесткость бетонной смеси (матрицы), с	Формовочное оборудование
I	П1	1–4	≤ 4	Прикрепляемые вибраторы, внутренние вибраторы
II	Ж1	–	5–10	Обычное вибрационное
III	Ж2	–	11–20	Вибрационное с пригрузом
IV	Ж3	–	21–30	Вибрационное со значительным пригрузом, вибропрессование, силовой прокат
V	Ж4	–	Более 30	Специальное оборудование, в том числе виброударная технология, роликовое формование

2. Прочность плотного бетона зависит в основном от соотношения между водой и цементом, т.е.

$$R_b = f(B/C), \quad (5)$$

где R_b – прочность бетона, Па.

Эту зависимость называют законом водоцементного соотношения

$$\frac{B}{C} = AR_c / (R_b + 0,8AR_c). \quad (6)$$

Отсюда

$$R_b = R_c \left(A \frac{B}{C} - 0,8A \right), \quad (7)$$

где A – коэффициент, равный 0,8 для высококачественных материалов, 0,75 – для материалов среднего качества и 0,65 – для цемента низких марок и мелкозернистого ШПБ $A = 0,65$);

R_c – активность цемента.

3. Консистенция смеси при определенных отношениях (В/Ц) и условной толщине оболочки цементного теста на зернах заполнителя δ почти не зависит от оптимального соотношения компонентов между заполнителями r , а определяется величиной δ , с возрастанием которой увеличивается подвижность смеси (правило постоянства консистенции).

4. Экспериментальным путем было найдено оптимальное соотношение между тонкомолотой добавкой (Д) и цементом (Ц), равное 1 : 1 по объему. При этом необходимое количество молотой добавки (в кг) определяется по формуле:

$$Д = \frac{Ц \gamma_{д}^{нас}}{\gamma_{ц}^{нас}} n, \quad (8)$$

где $Ц$ – масса цемента, кг;

$\gamma_{\text{д}}^{\text{нас}}$ – объемная насыпная масса молотой добавки, кг/м³;

$\gamma_{\text{ц}}^{\text{нас}}$ – объемная насыпная масса цемента, кг/м³;

n – отношение молотой добавки к цементу по объему:

$$\frac{\text{Д}}{\text{Ц}} = 1. \quad (9)$$

5. Оптимальное объемное соотношение между заполнителями (фиброй и шлакопемзовым песком) r_0 никогда не превышает величины r_m , соответствующей максимальной плотности (d_m) смеси сухих заполнителей. Чем больше максимальная удельная поверхность S_m , условная толщина оболочки цементного теста на зернах заполнителя δ и, следовательно, β – коэффициент заполнения пустот в заполнителе цементным тестом, тем существеннее разница между r_0 и r_m , т.е. всегда $r_0 \leq r_m$ (правило оптимального r). На основании закономерностей (3) и (6) применяем формулу для определения оптимального объемного соотношения между заполнителями

$$r_0 = \left(2 - V_6 \frac{d_m}{V_3^a} \right) r_m. \quad (10)$$

Изложенные правила позволили дополнить уравнения (1) и (2) зависимостями (3), (7) и (10). Если задать в начальном расчете объем вовлеченного воздуха, то количество неизвестных будет соответствовать числу уравнений, и задача назначения состава бетона становится математической зависимостью.

Следует отметить, что математические зависимости и графики, созданные на основе перечисленных правил, верно сравнивая общие закономерности, характерные для бетонных смесей и бетонов, не являются абсолютно точными, а заблаговременно подсчитанный с их применением расход компонентов не всегда дает материалы требуемого качества. В случае недопустимых отклонений от требуемой прочности или удобоукладываемости предусмотрена соответствующая математическая корректировка по результатам контроля.

Порядок работы по назначению состава сталефиброшлакопемзобетона:

1. Назначение диаметра и длины фибры. При этом учитывают, что для экономии вяжущего целесообразно иметь возможно большие размеры применяемых фибр. Однако необходимо помнить, что их размеры также ограничиваются сечениями изделия, которое в свою очередь влияет и на ориентацию фибр в конструкции. В связи с этим размеры контрольных образцов должны соответствовать поперечному сечению конструкций, для которых и будет применяться соответствующий состав.

2. Назначение консистенции смеси. Известно, что повышение жесткости бетонной смеси всегда дает экономию цемента, но требует для уплотнения более мощного формовочного оборудования или увеличения продолжительности уплотнения. Введение в состав бетонной матрицы фибр приводит к значительному повышению жесткости [2–6], поэтому максимальную жесткость матрицы целесообразно брать $J \leq 10$ с.

3. Определение водопотребности бетонной смеси (матрицы). Ее находят по формулам (3) и (4), при этом следует учитывать, что полученные результаты соответствуют экспериментам на стандартных компонентах (диаметр фибр 0,25 мм, длина фибры 25 мм). Если же используются иные размеры фибр или применяются добавки, то расход воды можно уточнить по формуле

$$B = K_d(B_c + B_\phi), \quad (11)$$

где K_d – коэффициент, учитывающий вид добавки (при использовании пластификаторов 0,9; суперпластификаторов 0,8);

B_ϕ – поправка на размеры фибр.

4. Определение водоцементного отношения по формуле (6). Следует учитывать, что если загрязненность шлакопемзового песка превышает допустимую по стандартам, то полученный результат надо умножить на 0,9, а для пропаренного бетона на 0,7, если применяется фибра с наличием смазки на поверхности, то на 0,7. Таким образом, максимальное снижение посчитанной величины, когда бетон пропаренный, песок загрязненный, а фибра необработанная, будет при коэффициенте $\Psi = 0,7 \cdot 0,7 \cdot 0,9 = 0,44$.

С экономической точки зрения следует применять $\frac{R_{ц}}{R_6} = 1,5 - 2,0$.

Если приходится применять вяжущее высокой активности, то уместно давать его в заниженном количестве, выполнив уменьшение активными добавками (шлак). Количество вводимой в цемент тонкомолотой добавки (Д), определяемой по (8), можно принять по формуле

$$D = 0,91Ц, \quad (12)$$

в которой учтено отношение объемных насыпных масс тонкомолотой добавки и цемента.

5. Подсчет расхода цемента

$$Ц = B / \left(\frac{B}{Ц} \right) \quad (13)$$

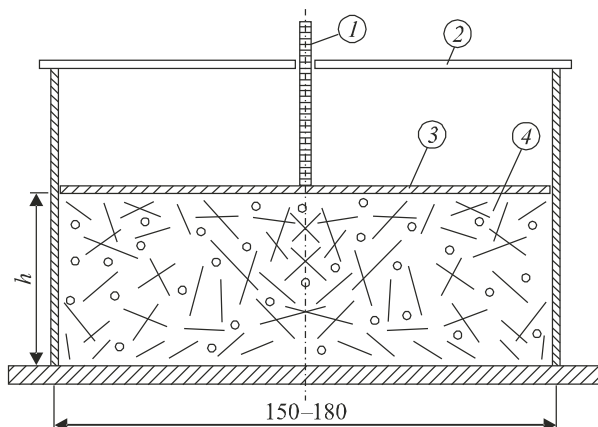
и расход добавки по формуле (12).

Абсолютный объем заполнителя в 1 м³ бетона

$$V_3^a = 1000 - \left(B + \frac{Ц}{\rho_{ц}} + \frac{D}{\rho_d} + B \right). \quad (14)$$

В формуле (14) $B = 20$ л, если в смесь не вводятся воздухововлекающие добавки; при наличии таких добавок $B = 50$ л.

6. Определение максимальных значений объемного соотношения между заполнителями (фиброй и шлакопемзовым песком) и плотности смеси сухих заполнителей. Учитывая влияние данных величин на экономичность бетона и в связи с этим важность точного их значения для конкретно применяемых заполнителей, целесообразно находить их экспериментально, используя следующую методику: смешивается 6 кг шлакопемзового песка и 0,3 кг фибры ($r = 0,175$), после перемешивания материал засыпается в цилиндр



Объеммер для определения средней плотности сыпучих материалов (фибры и песка)

1 – линейка на штоке (фиксируется так, чтобы при отсутствии материала ее нулевое деление находилось на уровне краев цилиндра); 2 – фиксатор уровня; 3 – разравнивающий диск (его масса 1000 ± 100 г); 4 – испытываемый материал

A volume meter for determining the average density of bulk materials (fiber and sand)

1 – the ruler on the rod (fixed so that, in the absence of material, its zero division was at the level of the edges of the cylinder); 2 – the level lock; 3 – the leveling disc (its mass is 1000 ± 100 g); 4 – the tested material

(рисунок) и уплотняется с разравнивающим диском на площадке. Если толщина слоя смеси заполнителей h , то

$$d = \frac{(\Phi + \Pi)(1 + r)}{Fh(\rho_{\Pi} + r\rho_{\Phi})} \quad (15)$$

Затем в смесь досыпается фибра до величины $r = 0,2$, после перемешивания и уплотнения вновь определяется d (берется несколько значений r , пока не будет достигнута минимальная пустотность смеси). За r_m следует принимать величину r , при значениях выше которой d не увеличивается или возрастает незначительно (численно это можно представить так: если при двух значениях $r_1 = r' + 0,025$ и $r_2 = r_1 + 0,025$ каждый раз будет получен прирост относительной плотности $\Delta d = 0,01$, то $r' = r_m$). Величина r_m обычно находится в интервале $0,1-0,2$, а $d_m = 0,65 - 0,75$.

Используя эту методику, r_m и d_m можно определять за 30–40 мин.

После этого по формуле (10) подсчитывается r_0 , а затем определяется масса пемзового песка (в кг)

$$\Pi = \frac{\rho_3 V_3^a}{(1 + r_0)} \quad (16)$$

с плотностью заполнителя

$$\rho_3 = \frac{\rho_{\Pi} + r_0 \rho_{\Phi}}{(1 + r_0)} \quad (17)$$

Тогда плотность фибры

$$\rho_{\phi} = \mu_{fv} \gamma_{\phi}, \quad (18)$$

где μ_{fv} – процент армирования по объему; γ_{ϕ} – удельный вес фибры.

Массу фибры определяем по формуле

$$\Phi = \Pi r_0 \text{ или } \Phi = \mu_{fm}(2 + \text{Ц} + \text{Д}), \quad (19)$$

где μ_{fm} – процент армирования по массе.

При определении r_0 (10) второе слагаемое (11) должно быть больше единицы. Если оно окажется меньше, то и $B < 1$, что свидетельствует о недостаточности цементного теста для заполнения пустот в смеси заполнителей. Для плотного бетона это недопустимо. В таком случае необходимо приравнять второе слагаемое формулы (11) к единице. Из полученного выражения найдем V_3^a и, решая совместно (14) и (13), вычислим расход воды и цемента, которые обеспечат $B = 1$. Принимая $r_0 = r_m$, по формулам (16) и (19) подсчитаем Π и Φ . При этом расход цементного теста нельзя уменьшать, даже если прочность превысит заданную. Для ее снижения и экономии вяжущего лучше вводить тонкомолотую добавку, количество которой можно подсчитать по формуле (8) или применить вяжущее более низкой активности.

Заключение. Приведенная в работе методика расчета и подбора состава сталефиброшлакопемзобетона в зависимости от количества, геометрических размеров и форм стальных фибр, которые оказывают значительное влияние на свойства бетонной смеси и бетона, значительно помогает упростить подбор состава, а в дальнейшем могут быть применены соответствующие корректировки для универсальности метода.

Список источников

1. Рабинович Ф.Н. Композиты на основе дисперсно-армированных бетонов. Вопросы теории и проектирования, технология, конструкции: Монография. М.: Изд-во АСВ, 2004. 560 с.
2. Уфимцев В.М., Коробейников Л.А. Шлаки в составе бетона: новые возможности // Технологии бетонов. 2014. № 6. С. 50–53.
3. Султанова Ю.Р., Каптюшина А.Г. Определение оптимального состава сталефибробетона // Вестн. Череповецкого гос. ун-та. 2012. № 4-2. С. 34–37.
4. Карпенко Н.И., Радайкин О.В. К определению деформаций изгибаемых железобетонных элементов с использованием диаграмм деформирования бетона и арматуры // Стр-во и реконструкция. 2012. № 2. С. 11–18.
5. Черноусов Н.Н., Стурова В.А., Чурсин Е.В., Ливенцева А.А. Математическое моделирование прочности центрально сжатого тонкостенного сталефибробетонного элемента // Современные наукоемкие технологии. 2021. № 2. С. 81–87.
6. Черноусов Н.Н., Стурова В.А., Чурсин Е.В., Ливенцева А.А. Определение коэффициента ориентации фибрового армирования по площади сечения сжатого элемента в зависимости от отношения размеров сечения и длин фибры в диапазоне $(0,1 \dots 0,4) h/l_f - (0,1 \dots 1,0) b/l_f$ // Развитие науки и образования: новые подходы и актуальные исследования: Сб. тр. по материалам XI Междунар. науч.-практ. конф. Анапа, 2020. С. 128–132.

References

1. *Rabinovich F.N.* Composites based on dispersed reinforced concrete. Questions of theory and design, technology, construction: Monograph. Moscow: ASV, 2004. 560 p. (In Russ.).
2. *Ufimtsev V.M., Korobeynikov L.A.* Slag in the composition of concrete: new opportunities. *Tekhnologii betonov = Concrete technologies*. 2014; (6): 50–53. (In Russ.).
3. *Sultanova Yu.R., Kaptyushina A.G.* Determination of the optimal composition of steel fiber reinforced concrete. *Vestnik Cherepovetskogo gosudarstvennogo universiteta = Bulletin of the Cherepovets State University*. 2012; (4-2): 34–37. (In Russ.).
4. *Karpenko N.I., Radaykin O.V.* To the determination of deformations of bent reinforced concrete elements using deformation diagrams of concrete and reinforcement. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya = Construction and reconstruction*. 2012; (2): 11–18. (In Russ.).
5. *Chernousov N.N., Sturova V.A., Chursin E.V., Liventseva A.A.* Mathematical modeling of the strength of a centrally compressed thin-walled steel-fiber concrete element. *Sovremennyye naukoemkiye tekhnologii = Modern high technology*. 2021; (2): 81–87. (In Russ.).
6. *Chernousov N.N., Sturova V.A., Chursin E.V., Liventseva A.A.* Determination of the orientation coefficient of fiber reinforcement over the cross-sectional area of a compressed element depending on the ratio of the cross-section dimensions and fiber lengths in the range $(0.1 \dots 0.4) h / l_f - (0.1 \dots 1.0) b // l_f$. Development of science and education: new approaches and topical research. Collection of works based on the materials of the XI International Scientific and Practical Conference. Anapa, 2020. P. 128–132. (In Russ.).

Информация об авторах

М.А. Гончарова – доктор технических наук

Н.Н. Черноусов – кандидат технических наук, генеральный директор ООО «НТО» ЭКСПЕРТ»

В.А. Стурова – аспирант, ассистент

А.А. Ливенцева – студент

Information about the authors

M.A. Goncharova – DSc

N.N. Chernousov – PhD, General Director of NTO EXPERT

V.A. Sturova – Post-graduate Student, Assistant

A.A. Liventseva – Student

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 21.09.2021
Одобрена после рецензирования 22.10.2021
Принята к публикации 28.10.2021

The article was submitted 21.09.2021
Approved after reviewing 22.10.2021
Accepted for publication 28.10.2021