

Е. П. Русин^{1}, Г. Н. Хан¹*

К разработке средств моделирования внедрения активного ковша ПДМ в штабель горной массы

¹ Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт горного дела им. Н.А. Чинакала» СО РАН, г. Новосибирск, Российская Федерация
* e-mail: gmmlab@misd.ru

Аннотация. Разработаны средства физического и численного моделирования внедрения ковша погрузочно-доставочной машины в штабель горной массы при концентрированном приложении статической и динамической нагрузок. Разработан и изготовлен лабораторный стенд, представляющий собой имитатор ковша, снабженный автоматическими одноударными устройствами. Последние, встречая сопротивление среды при внедрении ковша в штабель модельного материала, автоматически срабатывают. Предварительные испытания стенда показали его работоспособность. Проведена модификация разработанной в ИГД СО РАН компьютерной программы PM2D, заключающаяся в представлении рабочего инструмента как совокупности дискретных элементов, на которых можно задавать граничные условия.

Ключевые слова: погрузочно-доставочная машина, активный ковш, штабель горной массы, лабораторный стенд, метод дискретных элементов, граничный дискретный элемент

E. P. Rusin^{1}, G. N. Khan¹*

On the development of means for simulating the penetration of an active LHD bucket into a rock pile

¹ Chinakal Institute of Mining SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation
* e-mail: gmmlab@misd.ru

Abstract. To study the penetration of a load-haul-dumper bucket into a rock pile under concentrated application of static and dynamic loads, tools for simulating this process have been developed. A laboratory test-bench has been developed and manufactured, which is a bucket simulator equipped with automatic single-impact devices. The latter, when encountering resistance from the medium in the process of inserting the bucket into a pile of model material are automatically triggered. Preliminary tests of the test-bench showed its workability. A modification of the PM2D computer program developed at the Institute of Mining SB RAS was carried out, which consists in representing the working tool as a set of discrete elements on which boundary conditions can be set.

Keywords: load-haul-dumper, active bucket, rock pile, laboratory test-bench, discrete element method, boundary discrete element

Введение

Необходимость повышения безопасности и производительности горных работ в усложняющихся горнотехнических условиях обуславливает современную тенденцию перехода к цифровым интеллектуальным производственным технологиям, роботизированным системам. В равной мере это относится к ковшовым

погрузочно-доставочным машинам (ПДМ), которые играют ключевую роль в сфере погрузки и транспортирования горной массы под землей [1, 2]. Одним из наиболее важных аспектов в этой области является определение оптимального – с точки зрения максимизации эффективности загрузки и минимизации энергопотребления – режима черпания раздробленной породы из навала [3].

Процесс черпания горной массы сложно автоматизировать из-за динамических и непредсказуемых взаимодействий между ковшом и породой [4]. Решения, которые подходят для однородных материалов, таких как гравий, не обязательно работают для горной массы по причине значительного распределения фрагментов пород по размерам [5]. К настоящему моменту в сообществе ученых-горняков сформировалась точка зрения о том, что для успешной автоматизации ковшовой погрузки необходимо улучшить понимание поведения фрагментированных горных пород [6].

Постановка задачи и выбор методов исследования

Известно [7], что фрагментированные твердые среды обладают дилатансионной (структурной) прочностью, которая тем выше, чем больше размер отдельных частей. Поэтому один и тот же рабочий орган при внедрении в крупнокусковую среду, по сравнению с мелкодисперсным материалом, испытывает значительно большее сопротивление. Для его снижения усилие внедрения прикладывают концентрированно, создавая в локальных областях большие, чем в случае распределенной нагрузки, напряжения, превышающие структурную прочность навала. При этом структура массива сыпучего материала локально разрушается, в ней образуются дефекты, снижающие прочность среды в окрестности концентрированного приложения нагрузки. За счет этого сопротивление внедрению рабочего органа падает.

Для реализации данного эффекта днище ковша некоторых погрузочных выполняется в виде плоского клина [8, 9], что позволяет снизить необходимое для внедрения в навал горной массы напорное усилие. Однако и при использовании такого конструктивного решения сопротивление внедрению ковша в штабель остается значительным. Для его преодоления идут на увеличение сцепного веса ПДМ, мощности их привода, прочности конструкции, что сопряжено с высокими капитальными и эксплуатационными затратами [8, 10].

Логичным в такой ситуации кажется дополнительное приложение к ковшу ударной нагрузки. Высокоамплитудные силовые импульсы, возникающие при этом на контакте режущей кромки и фрагментов породы, заставляют штабель деформироваться более интенсивно. Проведенными в ИГД СО РАН экспериментами показано, что при дополнительном воздействии ударным устройством на макет ковша породопогрузочной машины статическое усилие внедрения снижается в 6-10 раз [11]. Целесообразным является совмещение двух изложенных выше принципов: приложение ударной нагрузки к штабелю и при этом концентрирование ее в локальных областях. Такой подход реализован в конструкции оснащенного ударными зубьями (активного) экскаваторного ковша [12] для разработки монолитных горных пород, прочность которых превышает предел до-

ступный для статического ковша. Запатентована, но пока не реализована на практике конструктивная компоновка ПДМ с активным ковшом [13].

Для эффективной натурной реализации активного ковша ПДМ необходимо изучить механику внедрения рабочего органа ПДМ в штабель горной массы при концентрированном приложении статической и динамической нагрузок. На настоящем этапе задача сводится к рассмотрению процессов, происходящих на контакте и в ближайшей окрестности контакта ударного рабочего органа с фрагментированной массой. Задача решается методами физического лабораторного и численного эксперимента. Последующее изложение посвящено разработке соответствующих средств моделирования.

Конструкция стенда для моделирования процесса внедрения рабочего органа ПДМ в штабель горной массы

Как упомянуто выше, задача настоящего исследования сводится к рассмотрению процессов, происходящих на контакте ударного рабочего органа с фрагментированной горной породой и в ближайшей окрестности контакта в период внедрения ковша в штабель. Поэтому элементы стенда, предназначенные для имитации процесса черпания, в нашем случае являются избыточными. Помимо этого, воздействие на штабель должно производиться при совмещении статического напора и ударной нагрузки. Наиболее близко указанным требованиям отвечает конструктивная компоновка стенда с активным ковшом [11], которую и примем за основу.

Конструктивные элементы разрабатываемого стенда (рис. 1) размещены на основании 1, на котором жестко закреплены бункер 2 (600x400x400 мм) с модельным сыпучим материалом (щебнем) 3 и гидроцилиндр 4, шток которого жестко соединен с датчиком силы 5, который в свою очередь жестко соединен со штангой-толкателем 6. Макет активного ковша (далее – ковш) 7, конструкция которого описана ниже, жестко соединен со штангой 6 посредством узла крепления 8, позволяющего изменять угол наклона ковша 7 к горизонтали. Для изменения высоты установки гидроцилиндра 4 при изменении угла наклона ковша 7 используют сменные прокладки, размещаемые под гидроцилиндром 7. Жесткость крепления гидроцилиндра 4 к основанию 1 обеспечивается регулируемым по высоте винтовым прижимом 9. В состав стенда входит компрессор 10, подающий сжатый воздух к ударным устройствам ковша 7 через магистраль 11, коллектор 12 и питающие шланги 13. Гидроцилиндр 4 приводится в действие маслостанцией 14 с электроприводом. Датчик 5 снабжен дисплеем 15, отображающим текущее значение напорного усилия, а также разъемом (на рисунке не показан) для соединения с записывающей аппаратурой.

Макет активного ковша (рис. 2) имитирует днище рабочего органа ПДМ и представляет собой плоскую платформу 1, имеющую возможность изменения угла наклона. На настоящем этапе исследований решено не снабжать ковш боковыми и задней стенками, при необходимости это может быть сделано впоследствии. На платформе 1 жестко закреплены пневматические одноударные устройства (пневмоударники) 2. В качестве последних использованы пневматические

одноударные машины ПОМ-6 разработки ИГД СО РАН. Пика 3 пневмоударника 2 выполняет функцию триггера, запускающего ударный механизм.

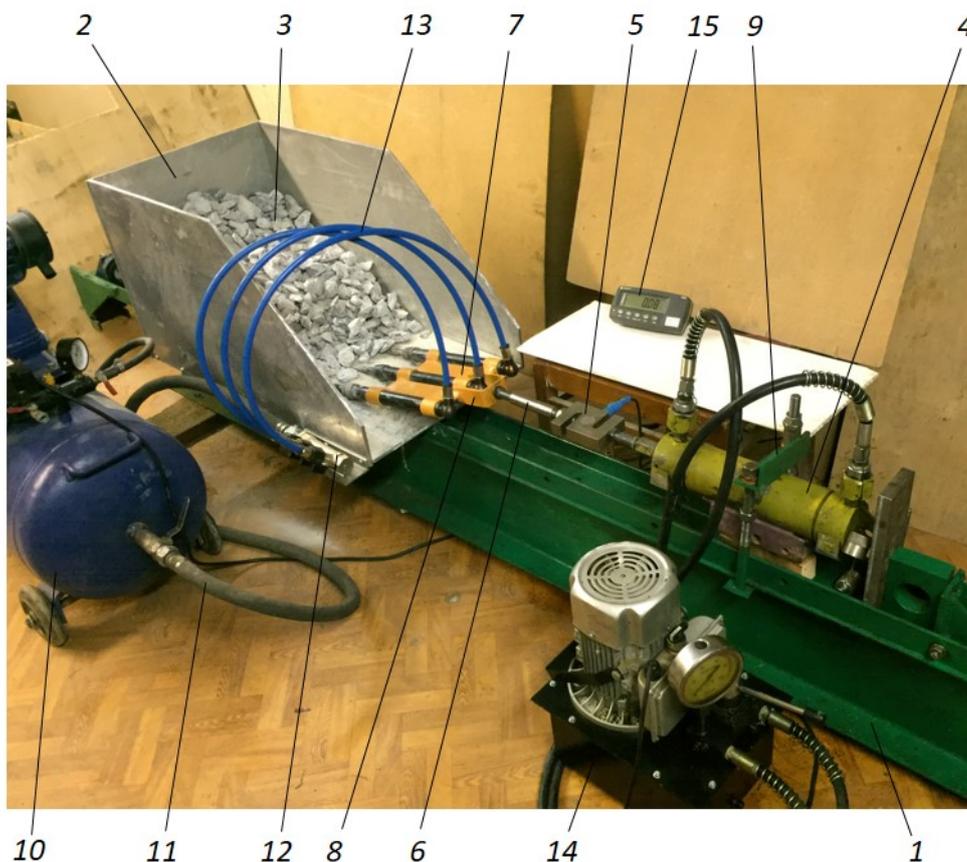


Рис. 1. Общий вид стенда для моделирования процесса внедрения рабочего органа погрузочно-доставочной машины в штабель горной массы при концентрированном приложении статической и динамической нагрузок (обозначения в тексте)

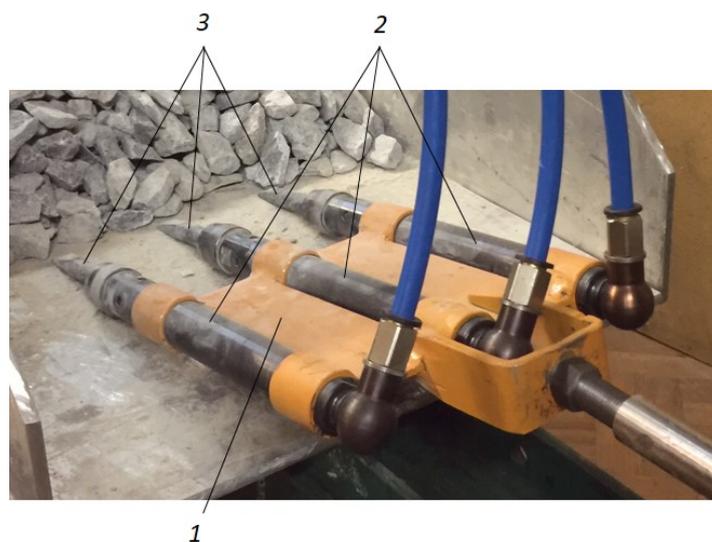


Рис. 2. Макет активного ковша ПДМ (обозначения в тексте)

Пика подпружинена и, хотя имеет некоторую осевую подвижность, постоянно находится в переднем положении. При движении ковша вперед и встрече пика с препятствием, которое оказывает сопротивление ее движению, пика несколько смещается назад и этим запускает ударный механизм. Пневмоударник срабатывает, по пике наносится удар, который передается препятствию. Под действием удара препятствие смещается вперед или в сторону и пика возвращается в переднее положение. При этом ударный механизм взводится, то есть снова переходит в состояние готовности к удару. При следующей встрече с препятствием цикл повторяется.

Проведены предварительные испытания стенда при горизонтальном и наклонном положениях ковша, а также при различных скоростях его перемещения. Во всех случаях, внедряясь в модельную среду, пневмоударники автоматически срабатывали с различными периодами между ударами. Датчик при этом показал скачкообразные изменения напорного усилия. С видеозаписями внедрения ковша в модельную среду можно ознакомиться по ссылке <https://cloud.mail.ru/public/FcQK/UNeATjxE7>.

Модификация компьютерной программы PM2D для исследования процесса внедрения рабочего органа ПДМ в штабель горной массы

Для численного решения указанной выше задачи используется разрабатываемая в ИГД СО РАН модифицированная компьютерная программа PM2D, основанная на методе дискретных элементов (МДЭ) [14]. Модификация PM2D требуется из-за сложности моделирования задач, связанных со взаимодействием механизма, рабочий инструмент которого внедряется в сыпучий материал. К настоящему времени численное моделирование взаимодействия рабочего инструмента с сыпучим материалом с использованием МДЭ ограничено возможностью задавать краевые условия на поверхности органа только в виде его перемещения с заданными линейными и угловыми скоростями [15, 16]. Для устранения указанного недостатка предлагается рабочий инструмент и ограждающие сыпучий материал поверхности представить состоящими из граничных дискретных элементов (ГДЭ), отличающихся от дискретных элементов (ДЭ) сыпучего материала тем, что на ГДЭ можно будет задавать граничные условия.

Рабочий орган может состоять из корпуса i (элемент-предок) и нескольких частей j_i, k_i (элементы-потомки), движения которых надо рассматривать относительно центра масс i -го предка (рис. 3). Число элементов-потомков не ограничивается показанными для примера на рис. 3 двумя элементами. В свою очередь, j_i -й и k_i -й элементы могут иметь своих собственных потомков l_{j_i}, m_{j_i} и т.д., для которых предками являются j_i -й и k_i -й элементы соответственно. Тогда движения l_{j_i} -го и m_{j_i} -го элементов надо рассматривать уже относительно центра масс j_i -го и k_i -го элементов. На рис. 3 символами $\Gamma_i, \Gamma_{j_i}, \Gamma_{k_i}, \Gamma_{l_{j_i}}, \Gamma_{m_{k_i}}$ обозначены граничные условия, которые могут быть заданы на соответствующих граничных дискретных элементах в четырех различных сочетаниях:

$$\mathbf{v}_\Gamma, \boldsymbol{\omega}_\Gamma; \mathbf{F}_\Gamma, \mathbf{M}_\Gamma; \mathbf{v}_\Gamma, \mathbf{M}_\Gamma; \mathbf{F}_\Gamma, \boldsymbol{\omega}_\Gamma; \quad (1)$$

где $\mathbf{v}_\Gamma, \boldsymbol{\omega}_\Gamma, \mathbf{F}_\Gamma, \mathbf{M}_\Gamma$ – векторы линейной скорости, угловой скорости, силы и момента ГДЭ соответственно. Таким образом, схема на рис. 3 является иерархически построенной системой из ГДЭ, связанных между собой структурой типа «потомок → предок». При соприкосновении ГДЭ с ДЭ между ними возникают такие же силы взаимодействия, как и между контактирующими ДЭ сыпучего материала.

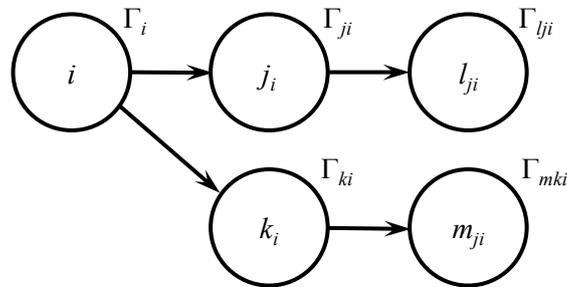


Рис. 3. Схема взаимодействия деталей рабочего органа (обозначения в тексте)

Рассмотрим взаимодействие рабочего органа погрузочно-доставочной машины, состоящего из корпуса и рабочего инструмента, с сыпучим материалом на примере, представленном на рис. 4.

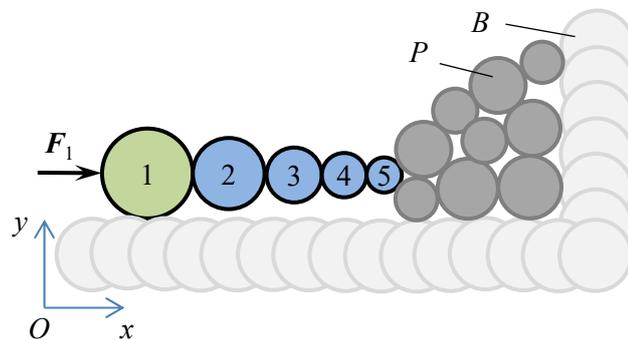


Рис. 4. Внедрение рабочего инструмента в сыпучий материал: 1 – ГДЭ корпуса; \mathbf{F}_1 – сила, приложенная к элементу 1; 2-5 – ГДЭ рабочего инструмента; B – ГДЭ ограждения; P – ДЭ сыпучего материала

На ГДЭ 1 задаются следующие граничные условия Γ_1 :

$$F_{x1} = F_{x1}^0, F_{y1} = 0, \boldsymbol{\omega}_1 = 0, \quad (2)$$

где F_{x1}, F_{y1} – компоненты вектора силы \mathbf{F}_1 , прилагаемой к ГДЭ 1; $F_{x1}^0 > 0$.

Рабочий инструмент моделируется совокупностью ГДЭ 2-5. На элемент 2 в зависимости от величины перекрытия δ_{21} элементов 1 и 2, задаются различные граничные условия. В начальный момент времени $t = 0$ считается, что $\delta_{21} = 0$.

Далее в результате действия компоненты силы F_{x1} на элемент 1, он смещается в сторону элемента 2 и начинает давить на него. В результате рабочий инструмент упирается своим последним элементом 5 в сыпучий материал P , как следствие, начинает расти величина перекрытия δ_{21} . В результате между элементами 1 и 2 возникает сила отталкивания F_{x12}^e . На данной стадии движения рабочего органа принимаются следующие граничные условия Γ_2 :

$$F_{x2} = 0, F_{y2} = 0, \omega_2 = 0; \delta_{21} < \delta_{21}^0, \quad (3)$$

где F_{x2}, F_{y2} – компоненты вектора силы F_2 , прилагаемой к ГДЭ 2; $\delta_{21}^0 > 0$ – заданная величина. При достижении $\delta_{21} = \delta_{21}^0$ на элементе 2 принимаются другие граничные условия:

$$F_{x2} = F_{x2}^0, F_{y2} = 0, \omega_2 = 0; \delta_{21} \geq \delta_{21}^0. \quad (4)$$

где $F_{x2}^0 > 0$ – заданная компонента граничной силы, направленная в ту же сторону, что и компонента силы F_{x12}^e , действующая на элемент 2 со стороны элемента 1. В результате действия суммарной силы F_{x2}^0 и F_{x12}^e на элемент 2 рабочий инструмент внедряется в сыпучий материал.

На ГДЭ 3-5 задаются граничные условия Γ_3 – Γ_5 в виде

$$F_{3-5} = 0, M_{3-5} = 0, \quad (5)$$

где F_{3-5}, M_{3-5} – векторы силы и момента на соответствующих ГДЭ.

Ограждающие сыпучий материал поверхности B состоят из ГДЭ, на которых заданы граничные условия Γ_B :

$$v_B = 0, \omega_B = 0, \quad (6)$$

где v_B, ω_B – векторы линейной и угловой скоростей ГДЭ.

Заключение

Разработан и изготовлен стенд для моделирования процесса внедрения рабочего органа погрузочно-доставочной машины в штабель горной массы при концентрированном приложении статической и динамической нагрузок. Стенд представляет собой снабженный одноударными устройствами имитатор ковша ПДМ, который под действием прикладываемого гидроцилиндром статического напорного усилия внедряется в штабель модельного фрагментированного материала при автоматическом срабатывании ударных устройств, встречающих сопротивление среды. Предварительные испытания стенда показали его работоспособность.

Проведена модификация компьютерной программы PM2D для исследования процесса внедрения рабочего органа погрузочно-доставочной машины в штабель горной массы при концентрированном приложении статической и ди-

намической нагрузок. Модификация заключается в представлении рабочего инструмента как совокупности дискретных элементов, на которых можно задавать граничные условия.

Работа выполнена в рамках проекта НИР № 121052600390-5.

Авторы благодарят Н.Д. Сырмина и С.И. Кондратенко за помощь в подготовке эксперимента.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Xiao, W., Liu, M., Chen, X. Research status and development trend of underground intelligent load-haul-dump vehicle – a comprehensive review // *Applied Science*. – 2022. – No. 12. – 9290. – <https://doi.org/10.3390/app12189290>.
2. Tampier, C., Mascaró, M., Ruiz-del-Solar, J. Autonomous loading system for load-haul-dump (LHD) machines used in underground mining // *Applied Science*. – 2021. – V. 11. – No. 18. – 8718. – <https://doi.org/10.3390/app111887181>.
3. Dadhich, S., Bodin, U., Andersson, U. Key challenges in automation of earth-moving machines // *Automation in Construction*. – 2016. – V. 68. – Pp. 212-222. – <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2016.05.009>.
4. Lindmark, D. M., Servin, M. Computational exploration of robotic rock loading // *Robotics and Autonomous Systems*. – 2018. – V. 106. – Pp. 117–129. – <https://doi.org/10.1016/j.robot.2018.04.010>.
5. Marshall, J.A. Mining Robotics. – In: Ang, M., Khatib, O., Siciliano, B. (eds) *Encyclopedia of Robotics*. – Berlin, Heidelberg: Springer, 2020. – https://doi.org/10.1007/978-3-642-41610-1_35-1.
6. Strategic research and innovation agenda for the Swedish mining and metal producing industry (STRIM). – Lulea, Sweden: Rock Tech Centre. – 2016. – 124 p. – http://photonicsweden.org/wp-content/uploads/STRIM-agenda_2016.pdf (08.12.2023).
7. Ревуженко А.Ф., Стажевский С.Б. Об учете дилатансии в основных справочных формулах механики сыпучих сред // *ФТПРПИ*. – 1986. – № 4. – С. 21-40. – <https://doi.org/10.1007/BF02500846>.
8. Скорняков Ю.Г. Системы разработки и комплексы самоходных машин при подземной добыче руд. – М.: Недра, 1978. – 232 с.
9. Trident SA. Atlas Copco CAVO 320 Air Loader. – <https://tridentsa.co.za/airloaders/cavo-320-air-loader/> (08.12.2023).
10. Стажевский С.Б., Фрейдин А.М., Русин Е.П. На подземных рудниках Швеции // *Горный журнал*. – 1991. – №10. – с.55 – 59.
11. Лабутин В.Н., Маттис А.Р. Способ снижения сопротивления внедрению ковша погрузочно-транспортной машины в штабель горной породы // *ФТПРПИ*. – 2011. – №3. – С. 74-81.
12. Шишаев С. В., Федулов А. И., Маттис А. Р. Расчет и создание ковша активного действия. – Новосибирск: ИГД СО АН СССР, 1989. – 113 с.
13. Лабутин В.Н., Маттис А.Р., Стажевский С.Б. Погрузочно-транспортная машина. Патент РФ №2298103. – БИ. – 2007. – № 12.
14. Cundall P.A., Strack O.D.L. A discrete numerical model for granular assemblies // *Geotechnique*. – 1979. – V.29, no. 1. – Pp. 47 – 65.
15. Takahashi, H. Simulation of the resistive forces acting on the bucket of wheel loader by use of DEM. – Proceedings of the 5th Asia-Pacific Regional Conference ISTVS, Seoul Korea, 1998. – <http://www2.kankyotohoku.ac.jp/htaka/Japanese/paper/htaka/pdf/2.pdf>
16. Meng, Y., Fang, H., Liang, G., Gu, Q., Liu, L. Bucket Trajectory Optimization under the Automatic Scooping of LHD // *Energies* – 2019. – V. 12. – No. 20. – 3919. – <https://doi.org/10.3390/en12203919>