

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ ВЕРТИКАЛЬНОГО ПНЕВОТРАНСПОРТА ИЗМЕЛЬЧЕННОГО ТОРФА НА ОТНОСИТЕЛЬНОЕ СКОЛЬЖЕНИЕ ВОЗДУШНОЙ И ТВЕРДОЙ ФАЗ

С.М. ПЕТРЕНКО, Н.И. БЕРЕЗОВСКИЙ, д-р техн. наук

Белорусский национальный технический университет, пр-т Независимости, 65, 220013, Минск, Республика Беларусь, e-mail: berezovsky@bntu.by

© Петренко С.М., Березовский Н.И., 2020

Численными методами определены действительные режимные параметры вертикального пневмотранспорта фрезерного торфа по известным из опыта перепаду давлений на участке пневмотранспортного трубопровода и расходным параметрам. Выполнена оценка влияния основных режимных параметров на коэффициент относительного скольжения воздушной и твердой фаз.

Ключевые слова: вертикальный пневмотранспорт, измельченный торф, действительные режимные параметры, воздушная и твердая фаза, относительное скольжение.

DOI: 10.46573/2658-5030-2020-3-50-58

ВВЕДЕНИЕ

Под режимными параметрами процесса пневмотранспорта сыпучих материалов понимаются факторы, изменение которых приводит к соответствующему изменению потерь давления на единице длины пневмотранспортного трубопровода. Анализ результатов теоретических и экспериментальных исследований показывает, что к ним относятся физические свойства; состояние и расход несущей воздушной фазы; массовая расходная концентрация или производительность по транспортируемому материалу; размерно-плотностные и аэродинамические характеристики транспортируемых частиц; геометрические размеры трубопровода и его расположение в пространстве.

В соответствии с физической моделью регулирования силового взаимодействия в потоке аэросмеси [1] изменение любого режимного параметра или их совокупности вызывает изменение условий взаимодействия поверхностных, массовых и инерционных сил в объеме движущейся аэросмеси, что приводит к переходу к режиму течения с другим значением истинной объемной концентрацией материала и другими удельными затратами энергии (потерями давления на единице длины пневмотранспортного трубопровода). Изменение истинной объемной концентрации частиц материала в потоке аэросмеси реализуется путем перехода к режиму течения с другим относительным скольжением воздушной и твердой фаз.

Скольжение воздушной и твердой фаз принято определять по величине коэффициента относительного скольжения: $\varepsilon = \mathcal{Q}_m / \mathcal{Q}_e$, где \mathcal{Q}_m и \mathcal{Q}_e – действительные (с учетом стеснения поперечного сечения пневмотранспортного трубопровода торфяными частицами) скорости частиц материала и воздуха соответственно. Экспериментальное определение истинной объемной концентрации или непосредственное измерение действительных скоростей торфяных частиц и воздуха достаточно сложны в отличие от регистрации так называемых расходных режимных параметров – расходной массовой концентрации $\mu = Q_m / Q_e$ и приведенных (отнесенных ко всему поперечному сечению трубопровода) скоростей воздуха

$V_g = 4Q_g / \pi D^2$ и частиц материала $V_m = 4Q_m / \pi D^2$, где Q_g и Q_m – массовые производительности по воздуху и торфяным частицам, кг/с.

Известны [2] экспериментальные зависимости перепада давления Δp на участке пневмотранспортного трубопровода длиной L от приведенной (отнесенной ко всему поперечному сечению трубопровода) скорости воздуха V_g при различных расходных массовых производительностях Q_m по измельченному торфю. Зависимости $\Delta p / L = f(V_g)$ получены при вертикальном пневмотранспорте образцов измельченного торфа с разными размерно-плотностными (средним диаметром d и плотностью торфяных частиц ρ_m) и аэродинамическими (приведенной скоростью витания V_{sn}) характеристиками в трубопроводах различных диаметров D . Типичный вид таких зависимостей $\Delta p / L = f(V_g)$ представлен на рис. 1.

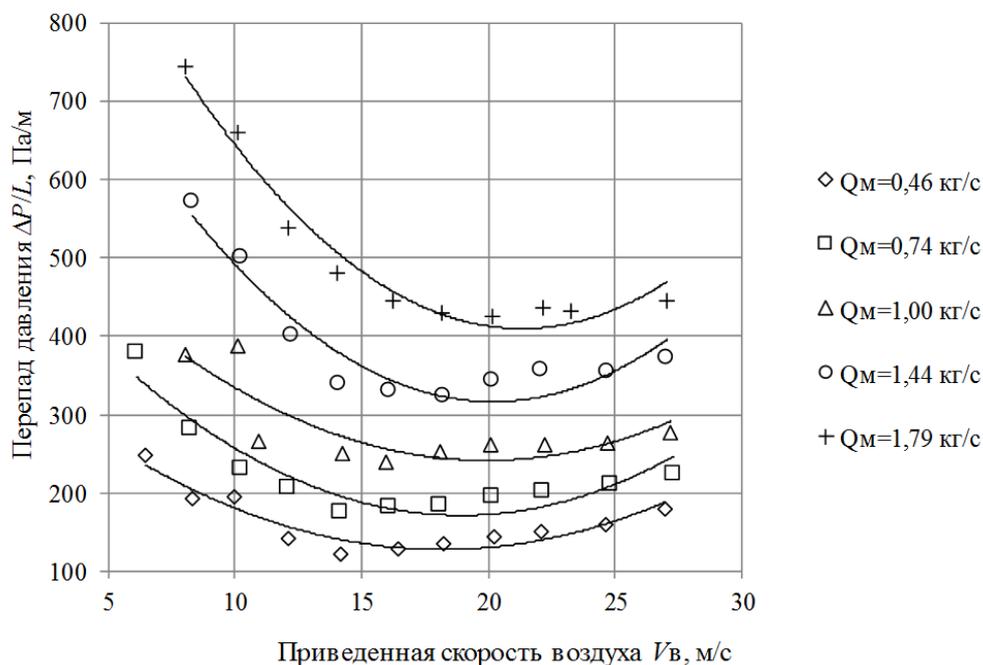


Рис. 1. Зависимости перепада давления на участке пневмотранспортного трубопровода от приведенной скорости воздуха при различных расходных массовых производительностях по измельченному торфю

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОГО СКОЛЬЖЕНИЯ ФАЗ

Для определения действительных скоростей частиц материала и воздуха из экспериментальных зависимостей $\Delta p / L = f(V_g)$ был реализован описанный ниже алгоритм [3].

При полной стабилизации течения аэросмеси за разгонным участком вертикального пневмотранспортного трубопровода уравнение движения торфовоздушной смеси имеет вид [4]

$$\frac{\Delta p}{L} = (1 - \varphi) \rho_g g + \varphi \rho_m g + (1 - \varphi) \lambda_g \rho_g \frac{g^2}{2D} + \varphi \lambda_m \rho_m \frac{g^2}{2D}, \quad (1)$$

где φ – истинная объемная концентрация торфяных частиц в аэросмеси; ρ_g и ρ_m – плотности воздушной и твердой фаз соответственно; g – ускорение свободного

падения; λ_g – коэффициент сопротивления перемещению воздушной фазы; λ_m – коэффициент сопротивления перемещению частиц твердой фазы.

Коэффициент сопротивления перемещению воздушной фазы определяется по действительной скорости воздуха эмпирическими зависимостями вида $\lambda_g = f(Re, \Delta/D)$, где $Re = \mathcal{G}_g D \rho_g / \eta$ – критерий Рейнольдса; η – динамическая вязкость воздуха; Δ – шероховатость стенок трубопровода.

Коэффициент сопротивления перемещению частиц твердой фазы в уравнении (1) находится из выражения [4]

$$\lambda_m = 2 \frac{gD (\mathcal{G}_g - \mathcal{G}_m) Abs (\mathcal{G}_g - \mathcal{G}_m)}{\mathcal{G}_m^2 \mathcal{G}_s^2 (1-\varphi)} - 2 \frac{gD}{\mathcal{G}_m^2} \left(1 - \frac{\rho_g}{\rho_m}\right) + \lambda_g \frac{\rho_g}{\rho_m} \frac{\mathcal{G}_g^2}{\mathcal{G}_m^2}, \quad (2)$$

где $\mathcal{G}_s = \mathcal{G}_{sn} (1-\varphi)^3 (1-(d_s/D)^2)^{3/2}$ – действительная (с учетом стеснения потока частицами транспортируемого материала) скорость витания; \mathcal{G}_{sn} – приведенная (без учета стеснения потока) скорость витания; d_s – эквивалентный диаметр полидисперсной смеси торфяных частиц.

Значения d_s , ρ_m и \mathcal{G}_{sn} определяются по известным степени разложения, степени механической переработки, влажности и гранулометрическому составу образца измельченного торфа [5].

Принято допущение об изотермическом процессе расширения воздуха при течении аэромеси в вертикальном пневмотранспортном трубопроводе. Тогда среднее по длине участка L , на котором измеряется перепад давления Δp , давление воздуха

$$p_{cp} = \frac{2,3 p_n \lg \frac{p_n}{p_k}}{(p_n / p_k - 1)},$$

где p_n и p_k – давление соответственно в начале и конце участка, на котором измеряется перепад давления.

Расчетная плотность воздуха на участке трубопровода

$$\rho_g = \rho_{вк} \frac{p_{cp}}{p_k}, \quad (3)$$

где $\rho_{вк}$ – плотность воздуха при давлении p_k .

Действительная скорость воздуха устанавливается по известной из опыта приведенной скорости V_g :

$$\mathcal{G}_g = \frac{V_g}{(1-\varphi)}.$$

Действительная скорость материала определяется по известной из опыта приведенной скорости материала V_m :

$$\mathcal{G}_m = \frac{V_m}{\varphi} = \frac{4Q_m}{\pi D^2 \rho_m \varphi}.$$

Для каждой пары значений $(\Delta p/L)_{on}$ и V_g при известном Q_m циклическими итерациями вычисляются значения действительных скоростей витания, воздуха и материала для каждого текущего значения истинной объемной концентрации при изменении последней от φ_{max} до φ_{min} с заданным шагом $d\varphi$. Затем вычисляются значения Re и коэффициента сопротивления воздушной фазы при текущем значении истинной концентрации.

Полученные значения используются для вычисления по уравнению (2) коэффициента сопротивления перемещению частиц твердой фазы при расчетной плотности воздуха (см. уравнение (3)). Далее вычисленные значения подставляются в (1) для определения расчетного значения $(\Delta p/L)_p$ при текущем значении истинной концентрации.

Расчетное значение $(\Delta p/L)_p$ сравнивается с опытным $(\Delta p/L)_{on}$. Если абсолютное значение разности расчетного и опытного значений $(\Delta p/L)_p - (\Delta p/L)_{on}$ превышает заданную погрешность вычислений δ , итерации повторяются с новым значением истинной объемной концентрации. Если текущее значение истинной объемной концентрации достигло φ_{min} и условие $|(\Delta p/L)_p - (\Delta p/L)_{on}| \leq \delta$ не выполняется, шаг изменения истинной объемной концентрации уменьшается и вычисления повторяются заново при изменении концентрации от φ_{max} до φ_{min} .

Значение истинной объемной концентрации φ , при котором выполняется условие $|(\Delta p/L)_p - (\Delta p/L)_{on}| \leq \delta$, удовлетворяет уравнениям (1) и (2) и соответствует реализуемой в данном конкретном случае пневмотранспорта совокупности действительных режимных параметров. По известному значению φ и расходным параметрам можно определить действительные скорости воздуха и материала, коэффициент относительного скольжения воздушной и твердой фаз и другие важные для понимания закономерностей процесса пневмотранспорта действительные параметры.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Типичный вид зависимостей $\varepsilon = f(V_g)$ при вертикальном пневмотранспорте одного из образцов (образец – фрезерный верховой торф, средний диаметр $d = 1,8$ мм, средняя плотность частиц $\rho_m = 845$ кг/м³) в трубопроводах разных диаметров D с различными массовыми производительностями Q_m , полученный обработкой экспериментальных зависимостей $\Delta p/L = f(V_g)$ по изложенной методике, представлен на рис. 2.

С увеличением действительной скорости воздуха коэффициент относительно скольжения возрастает при всех реализованных совокупностях режимных параметров пневмотранспорта.

Влияние на относительное скольжение фаз размеров и плотности торфяных частиц при вертикальном пневмотранспорте в трубопроводе одного диаметра ($D = 0,053$ м) при близких значениях массовой производительности по транспортируемому материалу характеризует рис. 3. Более мелкие, но менее плотные частицы фрезерного торфа со средним диаметром $d = 1,8$ мм и плотностью $\rho_m = 845$ кг/м³ достигают более высокой скорости и имеют при прочих равных условиях большее значение коэффициента относительного скольжения. Более крупные частицы дробленого верхового торфа со средним диаметром $d = 5,5$ мм имеют большую

плотность ($\rho_m = 935 \text{ кг/м}^3$) вследствие механической переработки и, следовательно, меньшее значение коэффициента относительного скольжения (обозначение плотности на рис. 3 – ρ).

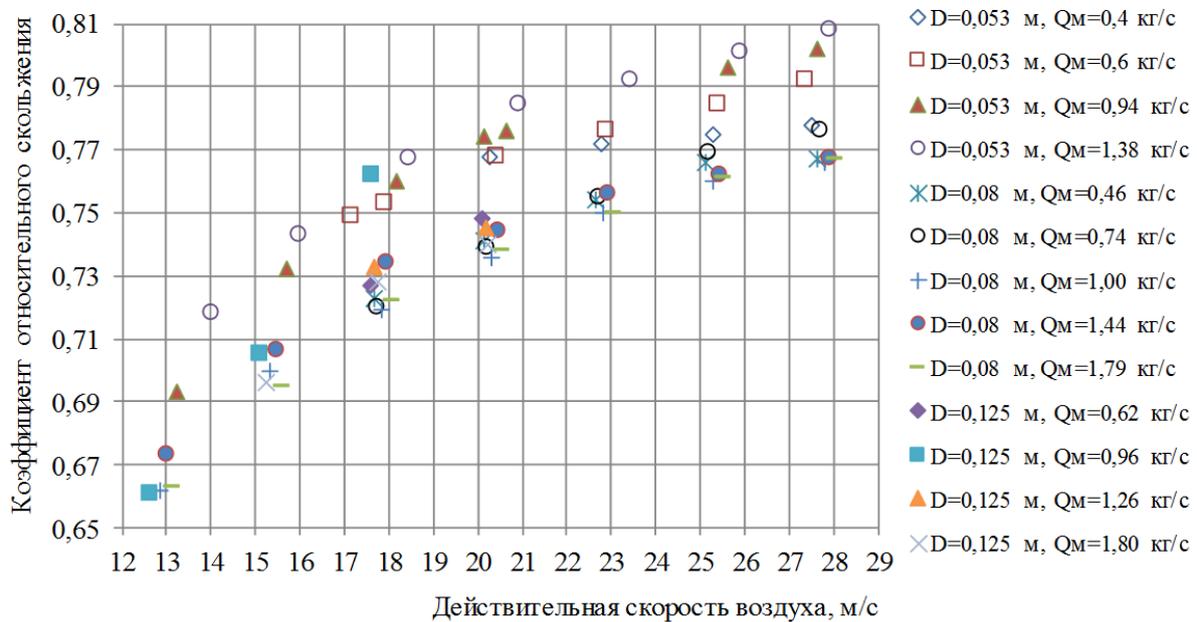


Рис. 2. Зависимости коэффициента относительного скольжения от действительной скорости воздуха при вертикальном пневмотранспорте фрезерного верхового торфа в трубопроводах разных диаметров



Рис. 3. Влияние на коэффициент относительного скольжения размера и плотности торфяных частиц

Приведенная скорость витания торфяных частиц \mathcal{G}_{sn} определяется соотношением их размеров и плотности [5]. Торфяные частицы с меньшими значениями скорости витания при вертикальном пневмотранспорте в трубопроводах одинакового диаметра с близкими значениями массовых производительностей разгоняются до больших скоростей при одной и той же скорости несущей воздушной фазы (рис. 4).

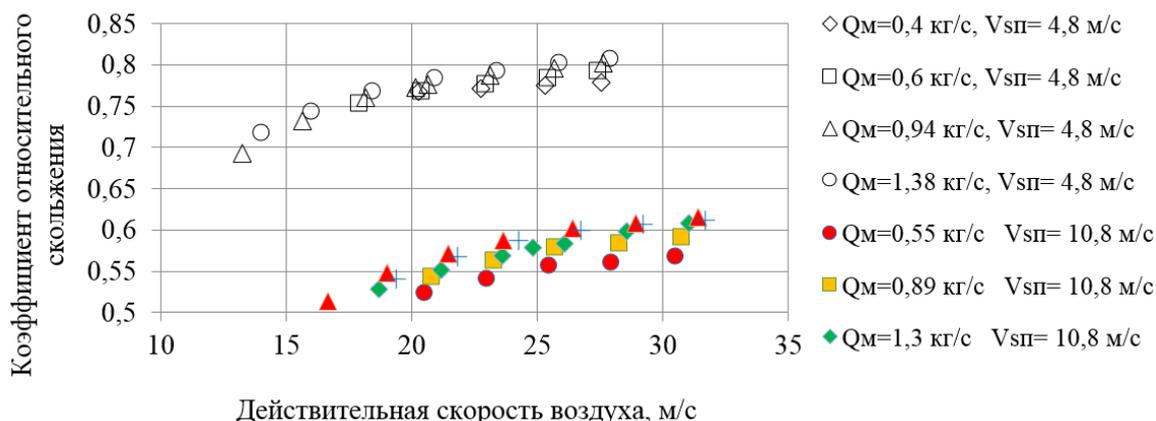


Рис. 4. Влияние приведенной скорости витания на коэффициент относительного скольжения

Влияние диаметра трубопровода на относительное скольжение фаз при вертикальном пневмотранспорте незначительно. На рис. 5 представлена зависимость $\varepsilon = f(V_g)$ для одного и того же образца измельченного торфа при пневмотранспорте его в трубопроводах диаметрами $D = 0,053$ м и $D = 0,125$ м при схожих производительностях по материалу Q_M .



Рис. 5. Влияние диаметра пневмотранспортного трубопровода на коэффициент относительного скольжения

Опытные точки (см. рис. 1) для реализованных значений Q_M получены при разных значениях приведенной скорости воздуха V_g . Поэтому для оценки влияния на относительное скольжение производительности Q_M экспериментальные зависимости $\Delta p / L = f(V_g)$ аппроксимировались полиномами (величина достоверности аппроксимации $R^2 = 0,895 \dots 0,964$). По полученным аппроксимирующим зависимостям вычислялись значения $\Delta p / L$ при различных Q_M для одинаковых фиксированных значений приведенной скорости V_g . Для вычисленных по полиномам значений $\Delta p / L$ при заданных значениях V_g и Q_M определялись соответствующие им значения коэффициентов относительного скольжения.

Коэффициенты относительного скольжения $\varepsilon = g_m / g_g$ при одинаковых фиксированных значениях скорости несущей воздушной фазы возрастают с увеличением массовой производительности (рис. 6).

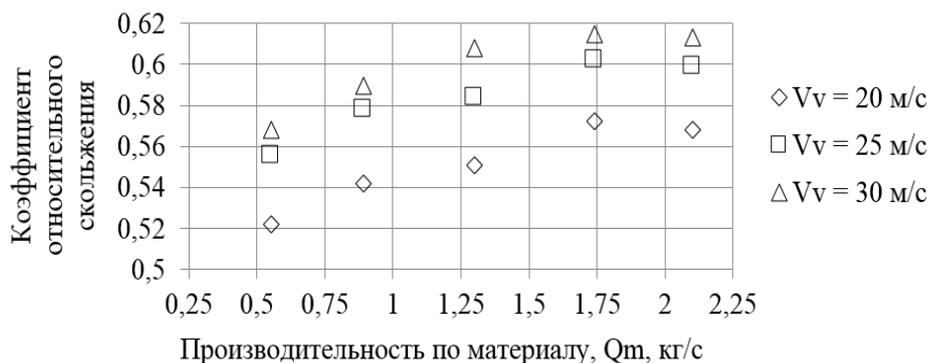


Рис. 6. Влияние массовой производительности по торфяным частицам на коэффициент относительного скольжения

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты показывают, что изменение любого режимного параметра процесса вертикального пневмотранспорта измельченного торфа или их совокупности приводит к соответствующему изменению относительного скольжения воздушной и твердой фаз. Наибольшее влияние на величину коэффициента относительного скольжения оказывают приведенная скорость витания торфяных частиц и массовая производительность, наименьшее – диаметр пневмотранспортного трубопровода.

ЛИТЕРАТУРА

1. Петренко С.М. Формирование режимов движения аэросмеси при пневмотранспорте сыпучих материалов // *Машины и технология торфяного производства*. Вып. 16. Минск: Вышэйшая школа, 1987. С. 73–77.
2. Бакшанский В.И. Исследование пневматического транспортирования измельченного торфа при повышенных концентрациях аэросмеси: дисс... канд. техн. наук. Минск, 1978. 259 с.
3. Петренко С.М. Методика определения действительных режимных параметров пневмотранспорта измельченного торфа // *Социально-экономические и экологические проблемы горной промышленности, строительства и энергетики: сборник научных трудов 9-й Международной научно-технической конференции: в 2 т. Т. 1*. Минск: БНТУ, 2013. С. 478–482.
4. Петренко С.М. Уравнения движения двухфазной среды в пневмотранспортном трубопроводе // *Проблемы технологии и механизации разработки месторождений полезных ископаемых: сборник научных трудов Международной научно-технической конференции, посвященной 100-летию со дня рождения Опейко Федора Александровича (Республика Беларусь, г. Минск, 20–23 февраля 2008 г.): в 2 ч. Ч. 1* / редкол. И.И. Лиштван и др. Минск, 2009. С. 106–109.
5. Кислов Н.В. Аэродинамика измельченного торфа / под. ред. И.И. Лиштвана. Минск: Наука и техника, 1987. 175 с.

Для цитирования: Петренко С.М., Березовский Н.И. Влияние режимных параметров вертикального пневмотранспорта измельченного торфа на относительное скольжение воздушной и твердой фаз // *Вестник Тверского государственного технического университета*. Серия «Технические науки». 2020. № 3 (7). С. 50–57.

EFFECT OF OPERATING PARAMETERS OF VERTICAL PNEUMATIC TRANSPORT OF CRUSHED PEAT ON RELATIVE SLIDING OF AIR AND SOLID PHASES

S.M. PETRENKO, N.I. BEREZOVSKY, Dr. Sc.

Belarusian National Technical University, 65, Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Belarus, e-mail: berezovsky@bntu.by

The actual operating parameters of the vertical pneumatic conveying of milled peat are determined by numerical methods on the grounds of the pressure differential in the pneumatic conveying pipeline section and flow rates known from experience. The assessment of the influence of the main operating parameters on the coefficient of relative slip of the air and solid phases is carried out.

Keywords: vertical pneumatic conveying, crushed peat, actual operating parameters, air and solid phase, relative slip.

REFERENCES

1. Petrenko S.M. The formation of the modes of movement of air mixtures during pneumatic transport of bulk materials. *Machines and technology of peat production*. V. 16. Minsk: Vysheyshaya shkola, 1987, pp. 73–77. (In Russian).
2. Bakshansky V.I. The study of pneumatic transportation of ground peat at elevated concentrations of air mixture: cand. dis. Minsk. 1978. 259 p. (In Russian).
3. Petrenko S.M. The methodology for determining the actual operating parameters of pneumatic transport of crushed peat. *Socio-economic and environmental problems of mining, construction and energy: Papers of 9th International scientific and technical conference: In 2 parts*. V. 1. Minsk: BNTU, 2013, pp. 478–482. (In Russian).
4. Petrenko S.M. Equations of motion of a two-phase medium in a pneumatic conveying pipeline. *Problems of technology and mechanization of mineral deposits development: collection of scientific papers of the International scientific and technical conference dedicated to the 100th anniversary of the birth of Fedor Opeyko (Republic of Belarus, Minsk, February 20–23, 2008)*: in 2 parts. V. 1, ed. I.I. Lishtvan et al. Minsk, 2009, pp. 106–109. (In Russian).
5. Kislov N.V. Aerodinamika izmelchennogo torfa [Aerodynamics of crushed peat] under. ed. I.I. Lishtvan. Minsk: Nauka i tekhnika, 1987. 175 p.

Поступила в редакцию/received: 16.06.2020; после рецензирования/revised: 15.07.2020;
принята/accepted 14.08.2020