

## ДОСЛІДЖЕННЯ БУКСУВАННЯ ВЕДУЧИХ КОЛІС ТРАКТОРА ПРИ РУСІ ПО ДЕФОРМУВАНІЙ ОПОРНІЙ ПОВЕРХНІ

**Подригало Михайло Абович**

доктор технічних наук, професор  
Харківський національний автомобільно-дорожній університет  
ORCID: 0000-0002-1624-5219  
email pmikhab@gmail.com

**Гецович Євгеній Мойсейович**

доктор технічних наук, професор  
Сумський національний аграрний університет  
ORCID: 0000-0003-4853-0839  
email getchovich-e@ukr.net

**Артюмов Микола Прокопович**

доктор технічних наук, професор  
Харківський національний технічний університет ім. П. Василенка  
ORCID: 0000-0002-2947-2947  
email artimovprof@ukr.net

**Холодов Михайло Павлович**

кандидат технічних наук, доцент  
Харківський національний автомобільно-дорожній університет  
ORCID: 0000-0002-5098-0022  
email michaelkholodov@gmail.com

*У статті запропоновані динамічна і математична модель руху колеса по деформованій опорній поверхні. Отримано аналітичні вирази з використанням результатів тягових випробувань самохідного шасі Т-16М. Ці аналітичні вирази можуть використовуватися при проведенні тягових розрахунків колісних тракторів і самохідних шасі на етапі їх попереднього проектування, а також здійснювати оцінку тягового ККД, продуктивності і енергоефективності.*

**Ключові слова.** Трактор, самохідне шасі, буксування, тяговий ККД, деформована поверхня

DOI: <https://doi.org/10.32845/msnau.2019.3.3>

### Вступ

Буксування ведучих коліс сільськогосподарського трактора при русі по деформованій поверхні робить істотний вплив на його тяговий ККД, продуктивність і енергоефективність.

Відомі дослідження, що дозволяють оцінити буксування ведучих коліс на асфальто-бетонній поверхні. Для вирішення зазначеного завдання при русі ведучих коліс по деформованій поверхні необхідно врахувати піддатливість ґрунту. У цій статті, з використанням результатів тягових випробувань самохідного шасі Т-16М, запропоновані динамічна і математична модель руху колеса по деформованій опорній поверхні. Отримані аналітичні вирази можуть використовуватися при проведенні тягових розрахунків колісних тракторів і самохідних шасі на етапі їх попереднього проектування.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

При дослідженні процесу кочення деформованого колеса широко використовується так званий «феноменологічний підхід» [1]. Сутність феноменологічного підходу до будь-якого явища або предмету полягає в тому, що предмет вивчення представляється у вигляді якогось, «чорного ящика», поведінку і властивості якого визначаються його зовнішніми характеристиками [1]. Завдання дослідження за допомогою феноменологічного походу полягає в знаходженні виду зазначених характеристик, причому внутрішні зв'язки і структура «чорного ящика» залишаються поза розглядом. Якщо

групу змінних, які входять в зовнішні характеристики досліджуваного об'єкта можна розділити на вхідні і вихідні, тоді значення зводяться до встановлення зв'язку між «виходом» і «входом» [1].

В результаті використання феноменологічного підходу з'явилася відома залежність для визначення буксування

$$\delta = \frac{\omega_k r_d - V_0}{\omega_k r_d} = 1 - \frac{V_0}{\omega_k r_d} \quad (1)$$

де  $\omega_k$  – кутова швидкість колеса ;

$r_d$  – динамічний радіус колеса

$V_0$  – лінійна швидкість осі колеса у напрямку його руху.

Поступальний рух колеса стійкий до тих пір, поки в контакт його з дорогою існує хоча б одна нерухома точка. В іншому випадку лінійна швидкість  $V_0$  починає зменшуватися від свого номінального руху до нуля [2]. Таким чином додаткова кутова швидкість колеса обумовлена кутовою деформацією шини і обмежена зчепленням колеса з дорогою. Тому б є псевдобуксуванням і визначається кутовою жорсткістю шини. На цю обставину неодноразово вказував у своїх роботах професор О.С. Федосов.

В роботі [3] для визначення додаткової кутової швидкості колеса, обумовленої кутовою деформацією шини використаний метод оберненого руху (рис.1).

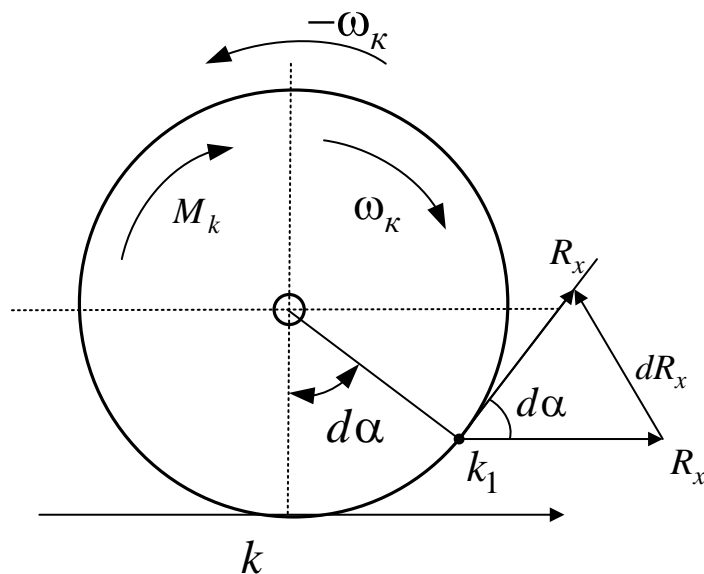


Рис. 1 Застосування методу оберненого руху для визначення додаткової кутової швидкості, обумовленої кутовою деформацією шини [3].

Автори робіт [3], використовуючи метод оберненого руху (рис.1) визначили кутову швидкість деформації шини

$$\dot{\varphi} = \frac{d\varphi}{dt} = \dot{R}_x \frac{r_{\partial}}{C_{кут}}, \quad (2)$$

де  $\varphi$  – кутова деформація шини;

$t$  – час;

$\dot{R}_x$  – швидкість зміни сили  $R_x$

$C_{кут}$  – коефіцієнт крутильної жорсткості шини.

Швидкість  $\dot{R}_x$  зміни сили  $R_x$  [3],

$$\dot{R}_x = \frac{dR_x}{dt} = R_x \omega_k, \quad (3)$$

В результаті використання співвідношень (2) і (3) дозволило авторам роботи [3] визначити наступну залежність відносного буксування від крутного моменту  $M_k$ , моменту опору коченню  $M_f$  і коефіцієнту крутильної жорсткості  $C_{кут}$  ..

$$\delta = \frac{M_k}{C_{кут}} \left( 1 - \frac{M_f}{M_k} \right), \quad (4)$$

Однак в роботі [3] не визначена залежність відносного буксування  $\delta$  від параметрів опорної поверхні при русі по деформованому ґрунтовому фоні.

#### Мета і постановка задач дослідження

Метою дослідження є визначення аналітичних залежностей, що дозволяють на етапі проектування розраховувати буксування і тяговий ККД тракторів і самохідних шасі.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- провести аналіз відомих результатів тягових випробувань самохідного шасі Т-16МГ
- отримати аналітичні вирази для розрахунку відносного буксування ведучих коліс при русі по деформованій поверхні.

#### Аналіз відомих результатів тягових випробувань самохідного шасі Т-16М

На рис. 2 приведені графіки залежності коефіцієнта відносного буксування від зусилля на гаку, отримані при проведенні випробувань самохідного шасі Т-16М [4]. У таблиці 1 наведені чисельні значення відносного буксування  $\delta$  при різних значеннях  $P_{кр}$  і ґрунтових фонах, отримані після обробки графіків, представлених на рис. 2.

Таблиця 1 – Значення коефіцієнта буксування  $\delta$  при силі тяги на гаку з  $P_{кр}$ 

Грунтовий фон	$\delta, \%$	Зусилля на гаку $P_{кр}, \text{кН}$						
		0	1,5	3,0	4,5	6,0	7,5	9,0
асфальт	0	0	0	0	0,75	1,50	4,00	11,00
оранка	5,00	6,25	11,25	16,25	21,875	36,25	–	–
стерня	0,94	1,84	5,25	8,62	12,5	17,5	43,75	–

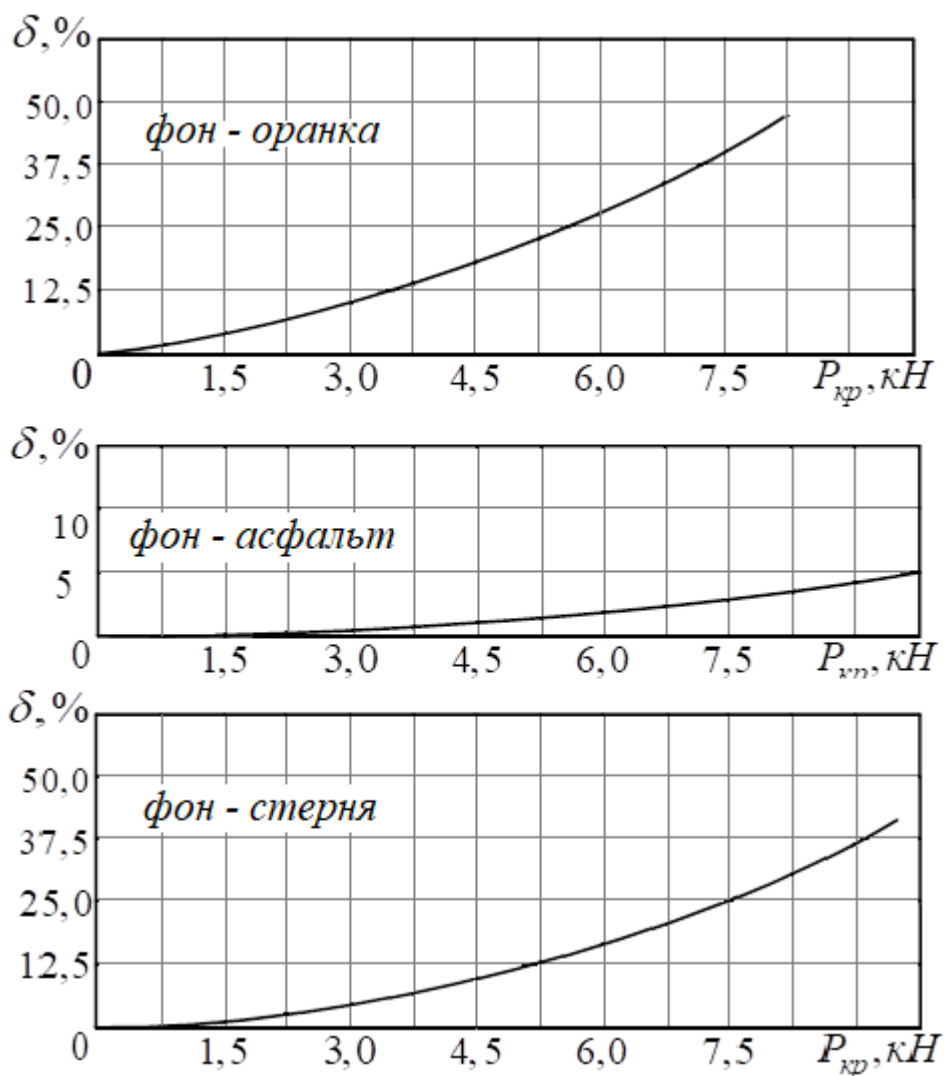


Рис. 2. Залежність коефіцієнту буксування від сили тяги на гаку

Враховуючи, що

$$M_k = \frac{1}{2} P_k r_\delta \quad (5)$$

і

$$M_f = P_z \cdot f \cdot r_\delta, \quad (6)$$

перетворимо вираз (4) до вигляду

$$\delta = (0,5P_k - P_z f) \frac{r_\delta}{C_{кут}}, \quad (7)$$

де  $P_k$  – тягова сила на ведучих колесах трактора;

$P_z$  – нормальне навантаження на шину;

$f$  – коефіцієнт опору кочення, який дорівнює:  $f$

$= 0,02$  – на асфальті,  $f = 0,1$  – на стерні і  $f = 0,16$  – на полі, підготованому під посів (оранка).

Відомо, що зусилля на гаку може бути визначено як

$$P_{кр} = P_k - m_9 g \cdot f, \quad (8)$$

де  $m_9$  – експлуатаційна маса трактора;

$g$  – прискорення вільного падіння,  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$

З рівняння (8) визначимо

$$P_k = P_{кр} + m_3 g \cdot f, \quad (9)$$

В роботі [5] отримано залежність, що зв'язує між собою крутильну жорсткість  $C_{кут}$  і нормальне навантаження на шину

$$C_{кут} = 8,0 \cdot P_z^{0,97} \cdot \frac{H \cdot M}{\text{рад}}. \quad (10)$$

Після підстановки виразів (9) і (10) у рівняння (7) отримаємо

$$\delta = \frac{0,5P_{кр} + f(0,5m_3g - P_z)}{8,0 \cdot P_z^{0,97}} \cdot r_\delta, \quad (11)$$

Самохідне шасі Т-16М(СШ-24), що проходило тягові випробування [4] мало наступні параметри:  $m_3 = 1810 \text{ кг}$ ;  $P_z = 7233 \text{ Н}$ ;  $r_\delta = 0,59 \text{ м}$ . На

На рис. 3 наведено графіки залежностей  $\delta(P_{кр})$ , які отримано за формулою (11) і при експериментальних дослідженнях

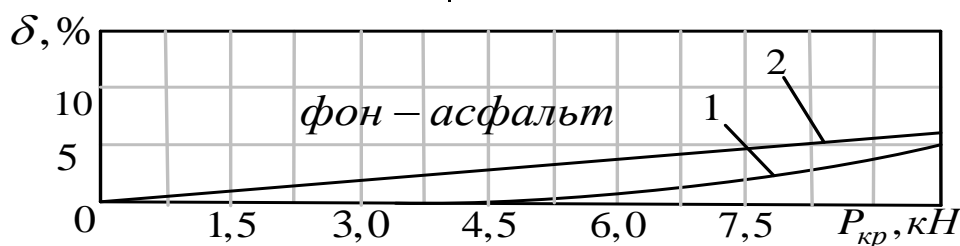


Рис. 3 Порівняння результатів теоретичного і експериментального визначення буксування ведучих коліс: 1 - експериментальна крива; 2 - теоретична крива.

Аналіз графіків, наведених на рис. 3 показує, що теоретична і експериментальна криві близькі, але має місце певна похибка. Зазначена похибка обумовлена похибкою визначення за емпіричною формулою (10). Крім того, крутильна жорсткість шини передбачалася постійною, тобто шина вважалася лінійною пружиною. Слід зазначити, що і експериментальні вимірювання проводилися з похибкою. З огляду на те, що при русі ведучого колеса по твердій опорній поверхні буксування не перевищує 6%, можна рекомендувати залежність (11) для попередніх розрахунків на стадії проектування тракторів і самохідних шасі.

#### Аналітичні вирази для розрахунку буксування ведучих коліс на деформованій опорній поверхні

При взаємодії деформованого колеса з опорною деформованою поверхнею динамічна модель процесу включає в себе дві послідовні пружини – пружну шину і пружний піддатливий ґрунт.

При послідовному з'єднанні двох пружин піддатливість системи дорівнює сумі піддатливості шини і ґрунту.

У цьому випадку рівняння (11) можна представити у вигляді

$$\delta = \left[ 0,5P_{кр} + f(0,5m_3g - P_z) \right] \cdot r_\delta \cdot \lambda_{см}, \quad (12)$$

де  $\lambda_{см}$  – кутова піддатливість пружної системи,

$$\lambda_{см} = \lambda_{ш} + \lambda_{почвы}, \quad (13)$$

$\lambda_{ш}$  – кутова піддатливість шини,  $\lambda_{ш} = 1 / C_{кут}$ ;

$\lambda_{грунту}$  – кутова піддатливість ґрунту.

Із рівняння (12) визначимо

$$\lambda_{см} = \frac{\delta}{\left[ 0,5P_{кр} + f(0,5m_3g - P_z) \right] \cdot r_\delta}, \quad (14)$$

або з урахуванням співвідношення (13) визначимо коефіцієнти кутової піддатливості ґрунту

$$\begin{aligned} \lambda_{грунту} &= \frac{\delta}{\left[ 0,5P_{кр} + f(0,5m_3g - P_z) \right] \cdot r_\delta} - \lambda_{ш} = \\ &= \frac{\delta}{\left[ 0,5P_{кр} + f(0,5m_3g - P_z) \right] \cdot r_\delta} - \frac{1}{C_{кут}} = \\ &= \frac{\delta}{\left[ 0,5P_{кр} + f(0,5m_3g - P_z) \right] \cdot r_\delta} - \frac{1}{8,0 \cdot P_z^{0,97} \cdot \frac{H \cdot M}{\text{рад}}}, \end{aligned} \quad (15)$$

У таблиці 2 наведені результати розрахунку коефіціє-

нта кутової піддатливості ґрунту  $\lambda_{грунту}$  при русі ведучого колеса трактора по стерні і по ґрунту.

Таблиця 2 - Визначення коефіцієнту  $\lambda_{грунту}$  піддатливості ґрунту

Ґрунтовий фон	Параметр	Зусилля на гаку $P_{кр}$ , кН						
		0	1,5	3,0	4,5	6,0	7,5	9,0
Стерня	$\delta, \%$	0,94	1,87	5,25	8,62	12,5	17,5	43,75
	$\lambda_{грунту} \frac{рад}{Н \cdot м}$	-	$0,121 \cdot 10^{-4}$	$0,309 \cdot 10^{-4}$	$0,379 \cdot 10^{-4}$	$0,444 \cdot 10^{-4}$	$0,532 \cdot 10^{-4}$	$1,364 \cdot 10^{-4}$
	$\lambda_{грунту} \frac{рад}{Н \cdot м}$	$0,356 \cdot 10^{-4}$						
Оранка	$\delta, \%$	5,00	6,25	1,25	16,25	21,875	36,25	-
	$\lambda_{грунту} \frac{рад}{Н \cdot м}$	-	$0,820 \cdot 10^{-4}$	$0,856 \cdot 10^{-4}$	$0,870 \cdot 10^{-4}$	$0,911 \cdot 10^{-4}$	$1,305 \cdot 10^{-4}$	-
	$\lambda_{грунту} \frac{рад}{Н \cdot м}$	$0,952 \cdot 10^{-4}$						

Аналіз значень,  $\lambda_{грунту}$  наведених у таблиці 2, показує, що їх величини при малих зусиллях на гаку ( $P_{кр} = 0$ ) і великих ( $P_{кр} = 9кН$ ) істотно відрізняються від величин, що знаходяться в середині інтервалу. Це пояснюється тим, що при малих  $P_{кр}$  вище похибка вимірювань, а при великих

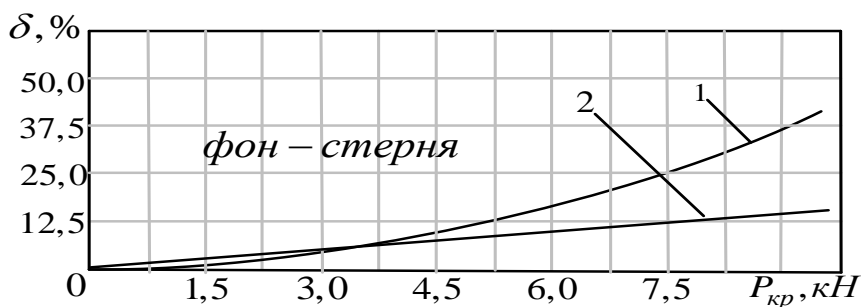
$P_{кр}$  з'являється схильність ведучих коліс до повного буксування. Тому, при усередненні результатів крайні значення  $\lambda_{грунту}$  не враховувалися.

Таким чином, для оцінки відносного буксування ведучих коліс при русі по деформованій основі в разі виконання оціночних розрахунків на етапі попереднього проектування колісних тракторів і самохідних шасі може бути запропонована наступна напівемпірична формула:

$$\delta = \left[ 0,5P_{кр} + f(0,5m_0g - P_z) \right] \cdot r_\delta \cdot \left( \frac{1}{8,0 \cdot P_z^{0,97}} + \lambda_{грунту} \right), \quad (16)$$

На рис. 4 для оцінки точності формули (16) наведені

графіки  $\delta(P_{кр})$ , що отримані експериментальним і теоретичним шляхом.



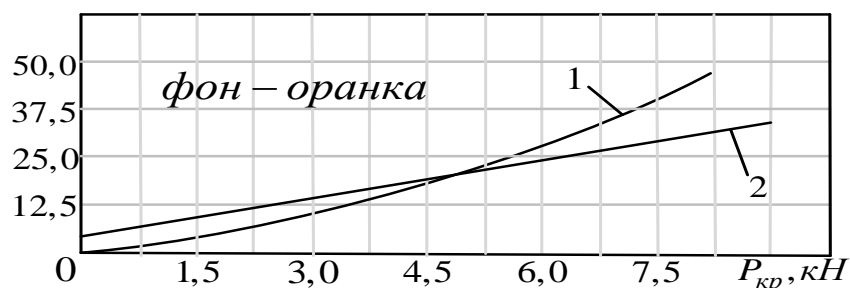


Рис. 4 Порівняння результатів теоретичної та експериментальної оцінки відносного буксування ведучих коліс на деформованій поверхні: 1 - експериментальні результати; 2 - результати за формулою (16).

За результатами аналізу рис.4 можливо зробити висновок, що в межах свого тягового класу для самохідних шасі результати експериментальних досліджень і теоретичних розрахунків майже співпадають.

Таким чином запропонована аналітична залежність (16) може використовуватися на етапі проектування тракторів і самохідних шасі для оцінки відносного буксування коліс і тягового ККД.

#### Висновки

1. В результаті проведеного дослідження запропонована аналітична залежність, що дозволяє на стадії проектування здійснювати оцінку відносного буксування ведучих коліс трактора при русі по деформованій опорній поверхні.

Це дозволяє на стадії проектування машини здійснювати оцінку тягового ККД, продуктивності і енергоефективності.

2. Для побудови кривих можуть використовуватися аналітично розраховані значення коефіцієнта кутової піддатливості ґрунту, які становлять:

$$- \lambda_{\text{ґрунту}} = 0,356 \cdot 10^{-4} \frac{\text{рад}}{\text{Н} \cdot \text{м}} \quad \text{– для сте-}$$

рні;

$$- \lambda_{\text{ґрунту}} = 0,952 \cdot 10^{-4} \frac{\text{рад}}{\text{Н} \cdot \text{м}} \quad \text{– для ора-}$$

нки.

#### Список використаної літератури:

1. Левин М.А., Фуфаев Н.А. Теория качения деформируемого колеса. –М.: Наука. Гл. ред. Физ.-мат. лиц., 1989. – 272с.
2. Назарько О.О. Удосконалення методів оцінки стійкості легкових автомобілів в тяговому режимі руху: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.22.20 – експлуатація та ремонт засобів транспорту / О.О. Назарько. – Харків, 2013. – 20с.
3. Подригало М.А., Артемов Н.П., Абдулгазис А.У. определение кинематического радиуса колеса автомобиля // Инженерия природокористування. Науковий журнал. – Харків, 2018. – №2(10). – с. 7-13.
4. Протокол №63-70 (ОП0108) испытаний опытного образца самоходного шасси Т-16М с мощностью двигателя 24л.с.(СШ24). – Харьков: ХЗТСШ, 1970.
5. Балакина Е.В. Улучшение устойчивости движения колесной машины в режиме торможения на основе пред проектного выбора параметров элементов шасси: автореф. дис. на соискание уч. степени докт. техн. наук: спец. 05.05.03. Колесные и гусеничные машины / Е.В. Балакина. – Волгоград, 2011. – 40с.

**Podrigalo M.A.**, Kharkiv National Automobile and Highway University

**Getsovich E.M.**, Sumy National Agrarian University

**Artiomov N.P.**, Kharkiv Petro Vasylenko National Technical University of Agriculture

**Kholodov M.P.**, Kharkiv National Automobile and Highway University

#### **Study of the tractor's driving wheels slipping during moving on a deformed surface**

*In the article a dynamic and mathematical models of wheel motion on a deformed surface are proposed. Analytical expressions were obtained using the results of traction tests of the T-16M self-propelled chassis. These analytical expressions can be used in traction calculations of wheeled tractors and self-propelled chassis at the stage of their preliminary design, as well as to evaluate traction efficiency, performance and energy efficiency.*

**Keywords.** Tractor, self-propelled chassis, slipping, traction efficiency, deformed surface

Дата надходження до редакції: 08.08.2019