

Weryfikacja modelu stateczności drzew na terenach zalewowych na przykładzie dębu *Quercus robur* L., sosny *Pinus sylvestris* L. i olchy *Alnus glutinosa* (L.) Gaertn.

Validation of a stability model for riparian forest trees: examples using pedunculate oak *Quercus robur* L., Scots pine *Pinus sylvestris* L. and black alder *Alnus glutinosa* (L.) Gaertn.

Tomasz Kałuża

Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu, Wydział Melioracji i Inżynierii Środowiska,

Katedra Inżynierii Wodnej i Sanitarnej, ul. Piątkowska 94A; 60–649 Poznań

Fax +48 61 848 77 27, e-mail: tomasz.kaluza99@gmail.com

Abstract. A tree's geometrical characteristics (diameter, trunk height, vertical and horizontal extent of roots) and the soil's geotechnical properties (type and state of soil) determine the critical force required to cause uprooting. This article presents a method for the estimation of the critical force causing uprooting of a tree during high winds and flooding in riparian forests. The model was tested for forest stands of black alder, Scots pine and pedunculate oak. The force required to pull up various trees was measured, and results used as the basis for formulation and verification of a theoretical model describing the critical threshold value for uprooting.

Key words: critical moments for trees, theoretical model of forest stand stability

1. Wstęp

Analiza stateczności drzew w drzewostanach dolinowych, w tym występujących na siedliskach łągowych, stanowi istotny aspekt ochrony przeciwpowodziowej. Wyrwane i płynące z nurtem drzewa i krzewy stwarzają istotne zagrożenia w trakcie przepływu wód powodziowych. Są one niebezpieczne dla mostów i innych budowli hydrotechnicznych, mogą też powodować powstawanie zatorów spiętrzających płynącą wodę. Ocena stateczności drzew polega na porównaniu ze sobą sił zewnętrznych działających na drzewo, wynikających z ekstremalnych warunków hydro-meteorologicznych (powódź, huragan), oraz jego odporności na wywrócenie (moment krytyczny). Wartości krytycznego momentu siły wywracającej w przypadku drzew zależą zarówno od parametrów rośliny, jak i podłoża. Specyfika drzewostanów dolinowych polega m.in. na okresowej zmienności parametrów gruntu związanych z uwilgotnieniem podłoża (zmiany poziomu wód gruntowych, okresowe zalewy) oraz dostosowaniem się układu korzeniowego drzew do warunków gruntowo-wodnych (Kałuża, Wierzbicki 2006).

W pracy przedstawiono wyniki badań nad oceną momentów krytycznych drzew sosny, olszy czarnej i dębu. Prace polowe polegające na wrywaniu drzew, z jedno-

czesnym pomiarem momentów krytycznych przeprowadzono na terenach zalewowych rzeki Warty w Częstochowie (olcha), w dolinie rzeki Samy w pobliżu Obrzycka (sosna) i doliny Warty w okolicy Jaskowa (dęby). Badaniom towarzyszyło rozpoznanie geotechnicznych warunków podłoża oraz szczegółowe pomiary geometryczne drzew. Wyniki posłużyły do przetestowania i weryfikacji teoretycznego modelu wytrzymałości drzew na wyrwanie.

2. Stateczność drzew

Rozpatrując możliwość wywrócenia się drzewa należy porównać ze sobą moment sił zewnętrznych działających na drzewo oraz moment krytyczny (Hartge 1985). Drzewo nie utraci stateczności, gdy spełniony jest warunek:

$$\frac{M_c}{M_w + M_o} > 1 \quad (1)$$

gdzie: M_c – moment krytyczny [kNm], M_w – moment wywracający na skutek działania wiatru [kNm], M_o – moment wywracający na skutek działania wody [kNm].

W przypadku wywrócenia się drzewa dominuje wpływ parcia dynamicznego wiatru (Kałuża 2010). Siła

wywracająca zależy od wielkości drzewa i równa jest oporowi stawianemu powietrzu przez strukturę roślinną (Nicoll et al. 2005; Peltola 2006). W celu wyznaczenia momentu wywracającego siły wiatru niezbędna jest m.in. znajomość parametrów drzew: średnicy pnia i powierzchni rośliny, na którą działa wiatr. W obliczeniach przyjęto uproszczenie, że powierzchnia ta odpowiada rzutowi korony drzewa na płaszczyznę pionową. Przy założeniu jednego kierunku działania wiatru, stałej wartości prędkości oraz stałej wartości współczynnika oporu powietrza, moment sił wywracających w wyniku działania naporu wiatru można przedstawić w postaci (MOC 1994):

$$M_w = \frac{1}{2} \rho_p C_K u_w^2 S_w \left(e + h_o + \frac{1}{3} \right) \quad (2)$$

gdzie: ρ_p – gęstość powietrza [kg/m^3], C_K – współczynnik oporu opływu drzewa przez powietrze, u_w – prędkość wiatru [m/s], S_w – powierzchnia drzewa, na którą działa wiatr [m^2], e – zagłębienie punktu obrotu bryły korzeniowej [m], h_o – wysokość pnia drzewa [m], L – wysokość korony drzewa [m].

Odporność na wywrócenie zależy od systemu korzeniowego rośliny, który jest charakterystyczny dla danego gatunku, oraz od rodzaju gruntu (Lundström et al. 2007). Krytyczny moment wywrócenia drzewa M_c [kNm] opisano w literaturze równaniem empirycznym (MOC 1994):

$$M_c = \alpha D^a \quad (3)$$

gdzie: D – średnica pnia drzewa (pierśnica) [m].

Stałe α i a mogą zostać wyznaczone na podstawie doświadczeń i zależą od warunków gruntowych oraz gatunku drzew (rodzaju systemu korzeniowego). Równanie (3) nie uwzględnia rodzaju podłoża. W tym względzie szczególną uwagę zwrócić należy na określenie rodzaju gruntu, kąta tarcia wewnętrznego, spójności czy wytrzymałości na ścinanie przy wykorzystaniu metod in situ (Wierzbiński 1997). Uwzględnić również należy wpływ poziomu zalegania zwierciadła wody na zmiany wilgotności gruntu i związane z tym zmiany cech wytrzymałościowych podłoża.

3. Metodyka eksperymentalnego wyznaczenia momentu krytycznego

Wyznaczenie momentu krytycznego w warunkach polowych polega na określaniu momentu siły potrzebnej do wyrwania drzewa na podstawie rejestracji wartości siły przyłożonej na określonej wysokości do drzewa. Wybierając homogeniczną pod względem gatunkowym próbę losową drzew, pamiętać należy o ich zróżnicowaniu pod względem pierśnicy oraz zachowaniu jedno-

rodności warunków podłoża. Zasadniczym elementem polowego stanowiska do mierzenia momentu krytycznego był dynamometr oparty na czujniku siły o zakresie do 200 kN, opracowany przez Zakład Elektroniki Pomiarowej Wielkości Nielektrycznych w Markach. W skład układu pomiarowego wchodził układ przetwarzający, karta analogowo-cyfrowa oraz laptop ze specjalistycznym programowaniem do śledzenia i rejestracji wyników. Poprzez współpracę dynamometru z komputerem możliwe jest precyzyjne notowanie narastania siły, aż do chwili wywrócenia drzewa. Źródłem siły był ciężki sprzęt budowlany wykorzystywany przy pracach drogowych oraz maszyny używane do zrywki drewna.

4. Lokalizacja obiektu badawczego

Eksperymentalną ocenę momentu krytycznego przeprowadzono na obszarze trzech obiektów doświadczalnych. Pierwszy zlokalizowany był na terenach zalewowych rzeki Warty w Częstochowie. Na rozpatrywanym obszarze (zarówno prawy, jak i lewy brzeg rzeki) na odcinku ok. 1200 m rósł drzewostan olszy czarnej [*Alnus glutinosa* (L.) Gaertn.], z domieszką klonu jesionolistego (*Acer negundo* L.). Do badań wybrano tylko olszę czarną. Na lewym brzegu było to 30 drzew, a na prawym 12. Pierśnica wyrwanych drzew wynosiła od 7 cm do 43 cm, a ich wysokość od ok. 6 m do 16 m.

Drugi obszar badawczy zlokalizowano na obrzeżach doliny rzeki Samy w pobliżu Obrzycka, w woj. wielkopolskim. Przedmiotem zainteresowania były dwa oddziały z drzewostanem sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris* L.) w Nadleśnictwie Oborniki, w leśnictwie Żurawiniec: oddział 1072d i oddział 1095b. Do badań zakwalifikowano 30 drzew. Pierśnica badanych drzew wynosiła od 12 cm do 43 cm, a ich wysokość od 15 m do 30 m.

Badania dla dębu wykonano w okolicach Śremu, w oddziale 167 leśnictwa Jaskowo, Nadleśnictwo Konstantynowo, gdzie wyrwano 31 okazów dębu szypułkowego (*Quercus robur* L.). Teren objęty badaniami położony jest na obrzeżach doliny zalewowej Warty, w sąsiedztwie krawędzi wyżej leżących tarasów zalewowych. Pierśnica badanych drzew wynosiła od 10 cm do 32 cm, a ich wysokość od 6 m do 23 m.

Pomimo że obszary badawcze zlokalizowane były w sąsiedztwie rzek, różniły się zasadniczo warunkami gruntowo-wodnymi podłoża, w którym rozwinięta była bryła korzeniowa. Teren nad Wartą w Częstochowie zajmował obszar terasy zalewowej, przy czym tylko w niektórych miejscach bryła korzeniowa rozwinięta była w gruntach rodzimych, czyli piaskach średnich występujących w stanie średnio zagęszczonym. Zdecydowana większość badanego obszaru pokryta była bowiem warstwą nasypów niekontrolowanych, o miąższości do-

chodzącej do 1 m. Ze względu na bardzo płytkie występowanie zwierciadła wody gruntowej (od 0,2 m do 1,0 m pod poziomem terenu) bryła korzeniowa olchy czarnej rozwinięta była więc w strefie gruntów nasywanych.

Teren badań nad Samą charakteryzował się jednorodną budową podłoża. Poziom wód gruntowych znajdował się około 4 m poniżej powierzchni terenu, co wpływało na odmienny niż w przypadku terenów zalewowych rozwój bryły korzeniowej. W podłożu występowały piaski średnie, niekiedy przewarstwione piaskami drobnymi, w stanie średnio zagęszczonym.

Przeprowadzone badania geologiczne poletek badawczych w Leśnictwie Jaskowo pozwalały przyjąć, że przypowierzchniowa warstwa podłoża na całym analizowanym obszarze miała niemal jednorodną budowę. Od powierzchni do głębokości około 0,5 m występowały piaski drobne z domieszkami humusu oraz przewarstwieniami pylastymi. Poniżej znajdowały się piaski drobne, których miąższość wynosiła od 0,6 m do ponad 1,5 m. Grunty przy powierzchni były w stanie luźnym, a głębiej przechodziły w stan średnio zagęszczony.

5. Teoretyczny model wytrzymałości drzewa na wyrwanie

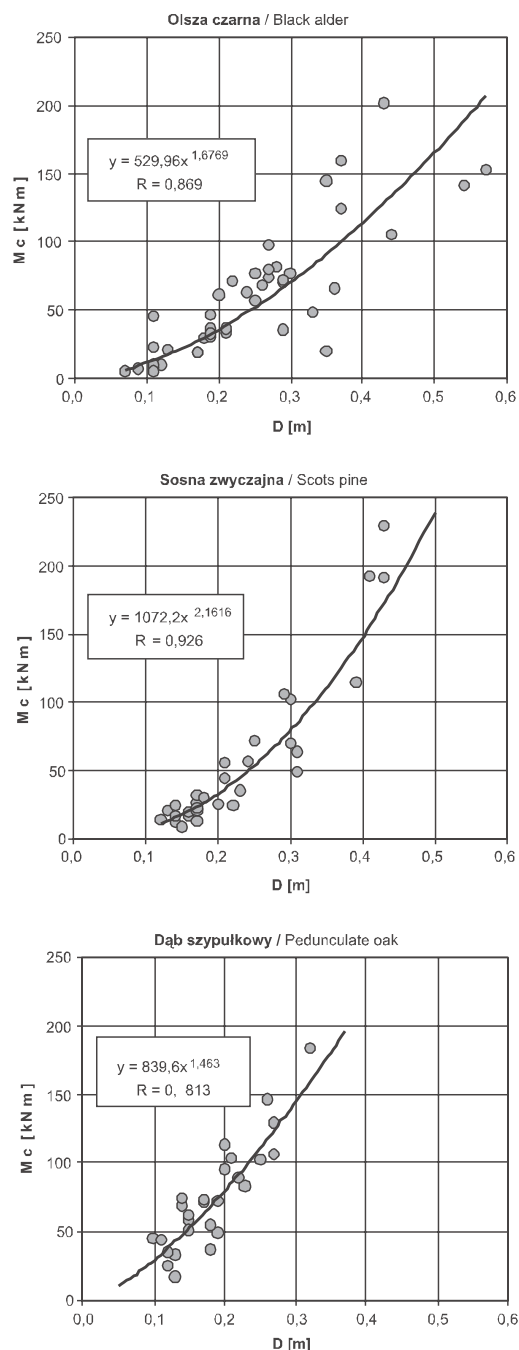
Pomierzone wartości momentu krytycznego zestawiono z pierśnicą drzew. Zgodnie z założeniami uzyskano ścisłą zależność korelacyjną w postaci funkcji potęgowej (ryc. 1). W praktyce uzyskane metodami statystycznymi modele stanowią najprostsze empiryczne zależności momentu krytycznego sił wywracających drzewo od jego pierśnicy. W zależnościach tych nie uwzględnia się jednak parametrów podłoża, w którym rosły poddane badaniom drzewa. Model taki miałby więc zastosowanie ograniczone tylko do warunków podobnych do tych, w jakich doszło do pomiarów. Poszukując bardziej uniwersalnych rozwiązań, należy powiązać wartości momentu krytycznego nie tylko z parametrami drzewa, ale również z parametrami podłoża.

Opracowanie modelu odporności drzewa na wywrócenie jest zadaniem złożonym, ze względu na samą analizę stateczności pionowej, ale także na fakt, że drzewo jest nie jednorodną konstrukcją, a rośliną o złożonych systemach korony oraz bryły korzeniowej. Podstawowym założeniem opracowanego modelu było przyjęcie, że w chwili wywrócenia następuje przekroczenie momentu krytycznego, równego sumie momentów sił utrzymujących drzewo:

$$M_w > M_c = M_u \quad (4)$$

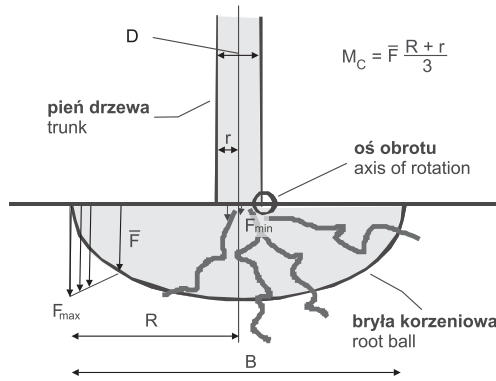
Gdzie: M_w – suma momentów sił wywracających [kNm], M_c – moment krytyczny [kNm], M_u – suma momentów sił utrzymujących [kNm].

W opracowywanym modelu przyjęto, że moment sił utrzymujących będzie wynikał jedynie z oporu bryły korzeniowej względem gruntu. Założono, że opór ten



Rycina 1. Zależność krytycznego momentu wywracającego M_c od pierśnicy dębu D

Figure 1. The relationship between the critical overturning momentum M_c and oak diameter D



Rycina 4. Schemat wyznaczania momentu krytycznego
Figure 4. The draft presenting value for estimation of the critical moment

wynika z oporu tarcia, jaki powstaje podczas przemieszczania korzeni względem gruntu. Takie założenie pozwala potraktować bryłę korzeniową jako swoistego rodzaju zespół kotwi, których nośność wynika z równania Coulomba (Najder 2003). Nie analizowano samej wytrzymałości korzeni na ścinanie, zakładając że wytrzymałość korzenia na rozciąganie jest większa niż opór tarcia pomiędzy gruntem a korzeniem. Traktując bryłę korzeniową jako układ sztywny (co jest koniecznym uproszczeniem) oraz zakładając trójkątny rozkład sił utrzymujących (5), moment utrzymujący M_c można wyznaczyć jako (ryc. 2):

$$M_c = \bar{F} \frac{R+r}{3} \quad (5)$$

gdzie: F – siła utrzymująca [kN], R – 1/2 średnicy bryły korzeniowej [m], r – 1/2 pierśnicy [m].

Przyjmując powyższe założenia, otrzymuje się ostateczną formułę określającą modelową wartość momentów utrzymujących drzewo, która przyjmuje postać (Kałuża, Wierzbicki 2006):

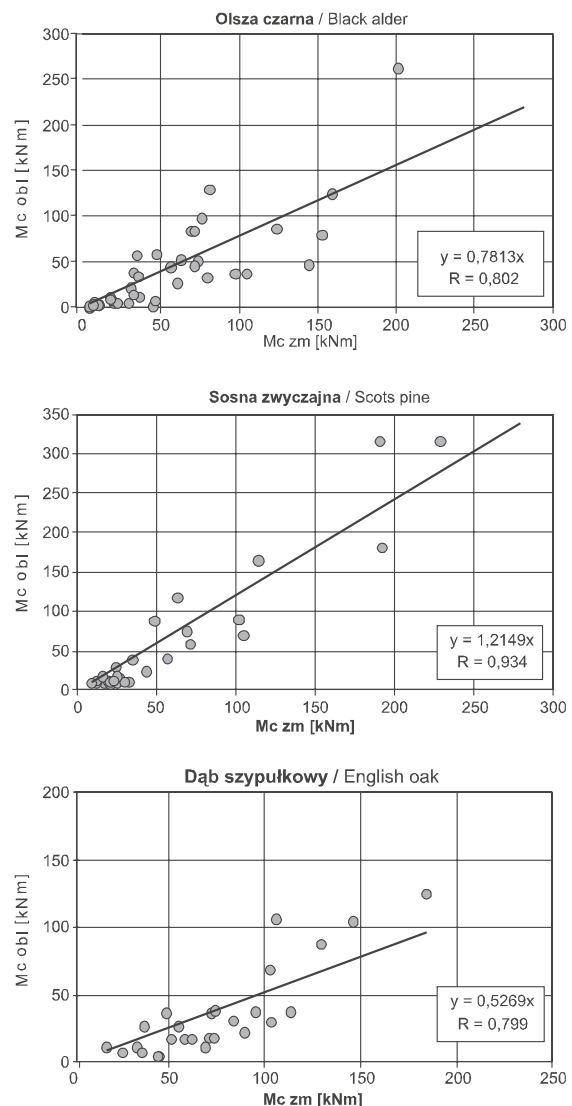
$$M_c = \left[K_0 \cdot \left(H \cdot \gamma + \frac{Q}{A_p} b \right) \cdot \text{tg} \phi + c_u \right] \cdot A_k \frac{B+D}{3} \quad (6)$$

gdzie: K_0 – współczynnik parcia spoczynkowego, H – maksymalna głębokość wykrotu po bryle korzeniowej [m], γ – ciężar objętościowy gruntu [kN/m³], Q – ciężar drzewa [kN], A_p – pole powierzchni rzutu bryły korzeniowej [m²], b – współczynnik korekcyjny ($b < 1$), ϕ – kąt tarcia wewnętrznego gruntu [°], c_u – spójność gruntu [kPa], A_k – całkowite pole powierzchni korzeni [m²], $B=2R$ – średnica bryły korzeniowej [m], D – pierśnica drzewa [m].

6. Weryfikacja modelu

Model w postaci zależności (6) sprawdzono i wytarowano na podstawie wyników badań terenowych krytycznych momentów wywracających dla olszy, sosny i dębu. Tarowanie modelu polegało na odpowiednim doborze współczynnika korekcyjnego b służącego do oceny składowej pionowej naprężeń w gruncie. W rezultacie porównania obliczonych wartości momentu krytycznego M_{Cobl} z wartościami zmierzonymi M_{Czm} uzyskano zależności przedstawione na rycinie 3.

Porównanie momentów zmierzonych i obliczonych wskazuje na dobrą korelację między modelem, a wynikami pomiarów ($R=0,802$ dla olszy, $R=0,934$ dla sosny i



Rycina 3. Porównanie wartości momentów krytycznych pomierzonych i obliczonych

Figure 3. The comparison between the critical overturning momentum M_c measured and calculated

$R=0,799$ dla dębu). Podkreślić należy, że uzyskane wyniki wskazują na konieczność odrębnego traktowania poszczególnych gatunków drzew. W wypadku sosny moment obliczony ma zazwyczaj wartości wyższe od wartości zmierzonych, a w wypadku olszy i dębu przeciwnie – wartości niższe od zmierzonych. W trakcie tarowania określono także wartości współczynnika korekcyjnego b (olsza – $b=0,09$, sosna – $b=0,06$, dąb – $b=0,07$).

7. Podsumowanie i wnioski

Przeprowadzone prace badawcze pozwoliły na zebranie doświadczalnych danych dotyczących momentów krytycznych różnych drzew: olszy czarnej [*Alnus glutinosa* (L.) Gaertn.], sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris* L.) i dębu szypułkowego (*Quercus robur* L.). Równocześnie opracowano teoretyczny model, pozwalający na analityczną ocenę momentu krytycznego. Model ten, oparty na analizie stateczności wywracanego drzewa, uwzględnia wpływ zarówno cech geometrycznych drzewa, jak i parametrów geotechnicznych podłoża. Zastosowanie modelu w praktyce wymagało przyjęcia wielu uproszczeń i skorzystania z zależności empirycznych opracowanych podczas eksperymentalnego wrywania drzew. W efekcie powstały teoretyczno-empiryczne rozwiązania umożliwiające ocenę momentu krytycznego na podstawie prostych i szybkich do wykonania badań terenowych. Wyrażna zależność zaobserwowana pomiędzy momentem krytycznym zmierzonym a obliczonym pozwala przypuszczać, że opracowany model można w toku dalszych prac badawczych rozwijać uwzględniając odmienne warunki gruntowe, a także sprawdzić jego przydatność dla innych gatunków drzew.

Literatura

- Hartge K. H. 1985. Wechselbeziehung zwischen Pflanze und Boden bzw. Lockergestein unter besonderer Berücksichtigung der Standortverhältnisse auf neu entstandenen Böschungen. *Ingenieurbiologie*. w: Wurzelwerk und Standsicherheit von Böschungen und Hängen, Jahrbuch der Gesellschaft für Ingenieurbiologie, Band 2, Aachen SEPIA, ISBN 3-925537-00-7.
- Kałuża T., Wierzbicki J. 2006. Ocena momentu krytycznego podatności drzewostanów na ekstremalne czynniki hydrometeorologiczne, Zagrożenia środowiska naturalnymi zjawiskami ekstremalnymi (red. M. Maciejewski, S. Ostojski). Warszawa, Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, s. 47–57. ISBN 83-88897-74-8.
- Kałuża T. 2010. Application of a 2-D flow model to the analysis of forest stability in the Vistula valley. w: *Environment engineering*. III (ed. L. Pawlowski, M. R. Dudzinska, A. Pawlowski). Boca Raton, New York, CRC Press (Taylor & Francis Group), s. 385–390. ISBN: 9780415548823.
- Lundström T. Jonsson, M.J. Kalberer, M. 2007. The root–soil system of Norway spruce subjected to turning moment: resistance as a function of rotation. *Plant and Soil*, 300, 1: 35–49. ISSN 0032-079X.
- MOC – Ministry of Construction. 1997. Proposed Guidelines on the Clearing and Planting of Trees in Rivers, Sankaido, Tokyo 155 s.
- Najder T. 2003. Wpływ roślinności na zmiany stateczności zboczy. *Inżynieria Morska i Geotechnika*, 2: 86–92. ISSN: 0867-4299.
- Nicoll B. Achim, A. Mochan, S. Gardiner, B. 2005. Does steep terrain influence tree stability? A field investigation, *Canadian Journal of Forest Research*, 35: 2360–2367. ISSN 0045-5067.
- Peltola H. 2006. Mechanical stability of trees under static loads, *American Journal of Botany*, 93 (10): 1501–1511. ISSN 1537-2197.
- Wierzbicki J. 1997. Budowa geologiczna i parametry geotechniczne podłoża w obrębie pradolin i rynien polodowcowych. Mat. II Ogólnopolskiej Konferencji Naukowej „Przyrodnicze i Techniczne Problemy Ochrony i Kształtowania Środowiska Rolniczego. Poznań, Wyd. Akademii Rolniczej w Poznaniu, s. 187–195. ISBN 83-7160-083-6.