ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1985

Seria : AUTOMATYKA z.78 Nr kol. 847

WOJCIECH MILL
INSTYTUT KSZTAŁTOWANIA
ŚRODOWISKA ODDZ. KATOWICE

ADAM WORSZTYNOWICZ
INSTYTUT KARBOCHEMII
GŁÓWNY INSTYTUT GÓRNICTWA

JEDNOWYMIAROWY MODEL ZMIAN STĘŻEŃ ZAWIESIN W RZECE W OKRESIE WEZBRANIA WODY

Streszczenie. W pracy przedstawiono model zmian stężeń i ładunków zawiesin w rzece w okresie wezbrania wody. Opisano procedury obliczeniowe, oraz przedstawiono przykład numeryczny oparty na obserwowanym wezbraniu wody w rzece Wiśle.

1. Wstęp

Prawidłowe funkcjonowanie zbiorników wodnych, przeznaczonych do zaopatrywania w wodę do picia, może być zagrożone głównie przez eutrofizację wody, oraz przez jej nadmierne zmętnienie wskutek wprowadzenia do zbiornika dużych ładunków zawiesin w okresie wezbrania wody w rzece zasilającej zbiornik. W przeciwieństwie do procesu eutrofizacji, zmętnienie wody zbiornika wskutek wezbrania wody w dopływie następuje w krótkim czasie. Zachodzi więc potrzeba wczesnego ostrzegania obsługi ujęć wodnych i stacji uzdatniania wody przed gwałtownym pogorszeniem się warunków eksploatacji wody ze zbiornika.

Na przykładzie zbiornika Goczałkowice, przeznaczonego do zaopatrywania w wodę do picia Górnośląskiego Ośrodka Przemysłowego, opracowano metodę wyznaczania wielkości ładunku zawiesin wprowadzanych do zbiornika przez rzekę Wisłę zasilającą ten zbiornik. Metoda polega na matematycznej symulacji zmian stężeń i ładunków zawiesiny transportowanej przez Wisłę w okresie wezbrania wody na odcinku Skoczów - ujście do zbiornika.

2. Charakterystyka obiektu badań

Obiektem badań jest odcinek rzeki Wisły od mostu drogowego w Skoczowie do mostu drogowego w Drogomyślu, który jest ostatnim przekrojem rzeki Wisły przed jej ujściem do zbiornika - nie objętym wpływem cofki zbiornika w okresie wyższych przepływów. Długość odcinka rzeki wynosi 9,2 km, a jego koryto jest uregulowane ze spadkiem dna skorygowanym 12 progami o średniej, projektowej wysokości 0,6 m. Rzeczywista wysokość progów w chwili obecnej została wyraźnie obniżona wskutek zamulenia.

W Skoczowie istnieje posterunek wodowskazowy IMGW z limnigrafem. W Drogomyślu zainstalowano własny punkt wodowskazowy. W obydwu przekrojach prowadzone są obserwacje stanów wody i pobory próbek wody w okresie wezbrań.

3. Założenia do konstrukcji modelu

Sposób opisu transportu zawiesin w rzekach zależy w głównej mierze od wielkości i zmienności ładunków zawiesin na wejściu do rozważanego układu, oraz od warunków hydraulicznych transportu zawiesin. W okresie wezbrań wody mogą ukształtować się dwa rodzaje warunków transportu zawiesin:

a/ zmienny dopływ masy zawiesin do rozważanego odcinka rzeki i zmienne warunki hydrauliczne. Taka sytuacja ma miejsce w przypadku gwałtownych, krótkotrwałych wezbrań wody,

b/ ustalony dopływ masy zawiesin i zmienne warunki hydrauliczne, co ma miejsce w przypadku długotrwałych wezbrań wody, kiedy po stosunkowo krótkim czasie ustala się wielkość transportowanego ładunku zawiesin na pewnym w przybliżeniu niezmiennym poziomie, mimo wyraźnej zmienności warunków hydraulicznych.

Prezentowany model matematyczny opracowano dla warunków opisanych w punkcie b/. Symulacja transportu zawiesin dla warunków opisanych w punkcie a/ jest przedmiotem obecnie prowadzonych prac.

Rozważa się rozprzestrzenianie wzdłużne całej masy zawiesin transportowanej przez strumień wody, a więc sumy zawiesin pochodzących ze źródeł zewnętrznych i z erozji koryta rzeki.

Praktyczny aspekt pracy, którym jest ostrzeganie ujęć wodnych na zbiorniku Goczałkowice, narzuca rozważanie rozprzestrzeniania się zawiesin w kierunku wzdłużnym odcinka rzeki zasilającego zbiornik.

Dzięki posterunkowi IMGW w Skoczowie istnieje możliwość kontroli wezbrań wody i ładunków zawiesin. Sygnał obserwowany w Skoczowie może więc być przekazany z wyprzedzeniem do ujęć wodnych na zbiorniku.

Przyjmując, że w okresie wezbrania wody, któremu towarzyszy wysoka turbulencja przepływu, cząstki zawiesin utrzymywane są w zawieszeniu, jako teoretyczną podstawę transportu zawiesin przyjęto proces wzdłużnej dyspersji masy. Założenie to wynika z analogii wykazanej przez Graf'a[1].

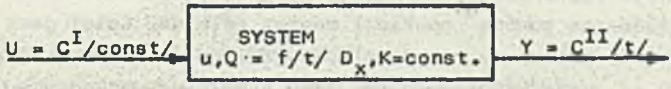
Przyjęte założenia do konstrukcji modelu można sformułować następująco:

- rozważany jest transport zawiesin w okresie występowania wezbrań wody,
- za teoretyczną podstawę transportu zawiesin przyjmuje się proces wzdłużnej dyspersji masy w strumieniu wody,
- efekt działania progów w korycie rzeki uwzględnia się w wielkości szorstkości koryta,,

- zakłada się jednowymiarowy, dyspersyjny transport zawiesin, nieustalony, z uwagi na zmienne w czasie warunki hydrauliczne przepływu,
- założono, że wskutek lokalnych zakłóceń przepływu możliwy jest zanik masy zawiesin w trakcie ich transportu.

4. Konstrukcja modelu

Model, symulujący sformułowany powyżej proces transportu zawiesin, można przedstawić w notacji używanej przez Box'a i Jenkins'a [2] następująco:



gdzie: U - sygnał wejściowy,
Y - sygnał wyjściowy,
C^I - stężenie zawiesin na wejściu,
C^{II} - stężenie zawiesin na wyjściu,
u - wzdłużna prędkość adwekcyjna wody,
Q - natężenie przepływu wody,
D_x - współczynnik dyspersji wzdłużnej,
K - stała szybkości zaniku masy zawiesin.

Matematyczna postać modelu jest następująca:

$$D_x \frac{d^2C}{dx^2} - u \frac{dC}{dx} - K \cdot C = 0 \qquad /1/$$

gdzie:
x - współrzędna wzdłużna strumienia.

Pozostałe oznaczenia jak wyżej.

Dla modelu opracowano dwie procedury obliczeniowe, z których jedna wyznacza propagację fali wezbraniowej, a druga czasowe i wzdłużne zmiany stężeń zawiesin.

4.1. Procedura propagacji fali wezbraniowej

Procedura ta oparta jest na metodzie zakładającej odkształcenie fali wskutek dyfuzji. Autorem tej metody jest Hayami [3], który wychodząc z równań ciągłości i pędu, przy pominięciu w nich składników inercyjnych, sformułował następujące liniowe równanie dyfuzji:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = K_x \frac{\partial^2 Q}{\partial x^2} - \bar{u} \frac{\partial Q}{\partial x} \qquad /2/$$

w którym:

Q - natężenie przepływu, $m^3.s^{-1}$,

t - czas, s,

x - współrzędna wzdłużna strumienia, m,

K_x - współczynnik dyfuzji fali, $m^2.s^{-1}$,

$\bar{u}$ - średnia prędkość adwekcyjna fali, $m.s^{-1}$.

Powyższe równanie zostało z powodzeniem zweryfikowane w praktyce dla liczb Froude'a mniejszych od 0,5. Dla rzeki Wisły na odcinku Skoczów - Drogomyśl liczba Froude'a wynosi 0,409, a więc warunek stosowalności równanie /2/ jest spełniony.

Stosując analogię do teorii układów liniowych proponowaną funkcję wyjścia układu, tj. hydrogram fali w końcowym przekroju $Q_o/x,t/$, uzyskuje się przez powiązanie funkcji wejścia układu z funkcją odpowiedzi układu za pomocą operacji zwanej splotem. Splot jest operacją opartą na założeniu, że dowolny sygnał wejściowy, w naszym przypadku $Q_D/Q,t/$, może być traktowany jako suma ciągu kolejnych impulsów. Aby wyznaczyć całkowitą wartość odpowiedzi $Q_o/t,x/$ w danej chwili t, wywołaną przez sygnał ciągły $Q_D/Q,t/$, należy zsumować wszystkie odpowiedzi wywołane elementarnymi impulsami występującymi w chwili t, czyli należy scałkować wyrażenie:

$$Q_o/x,t/ = \int_{t_1=-\infty}^{t_1=t} Q_D/C,t-t_1/ \; I\ /x,t_1/ \quad dt_1 \qquad /3/$$

gdzie:

$Q_o/x,t/$ - czasowa funkcja natężenia przepływu w punkcie odległym o x od przekroju początkującego odcinek rzeki, $m^3.s^{-1}$,

$Q_D/O,t/$ - czasowa funkcja natężenia przepływu w przekroju początkującym odcinek rzeki x = O, $m^3.s^{-1}$,

$I\ /x,t/$ - czasowa funkcja odpowiedzi impulsowej w punkcie x.

Funkcja impulsu jednostkowego dla odcinka kanału jednorodnego ma następującą postać:

$$I\ /x,t/ = \frac{x}{/4\pi K_x t^3/^{1/2}} \exp\left[-\frac{/\bar{u}.t-x/^2}{4K_x t}\right] \qquad /4/$$

Oznaczenia jak w równaniu /2/.

Za pomocą równań /3/ i /4/ wyznacza się odpowiedź układu na jednostkowy sygnał wejściowy. Chcąc uzyskać sumaryczny hydrogram fali wezbraniowej w przekroju końcowym badanego odcinka rzeki, należy zsumować wszystkie odpowiedzi układu na jednostkowe sygnały wejściowe, tj. jednostkowe natężenia przepływu w przekroju początkowym:

$$Q_o/x,t/ = \sum_{i=0}^{M} /Q_{0,i+1}/ \int_{0}^{t-i\,\Delta t} \frac{L}{/4\,K_x\,t_1/^{3/2}} \exp -\left[- \frac{/\bar{u}\,.\,t_1 - L/^2}{4\,K_x\,t_1} \right] dt_1 \qquad /5/$$

gdzie:

L - całkowita długość odcinka rzeki, m,

$$M = \min \; Int \; /-\frac{t}{\bar{t}} - 0{,}01/, \; N-1, \qquad /6/$$

Δt - przyrost czasu, s,

N - liczba przyrostów czasowych.

Pozostałe oznaczenia jak w równaniach poprzednich.

4.2. Procedura wyznaczania transportu zawiesin

Ogólne równanie transportu zawiesin /1/ ma dla warunku początkowego:

$$C = C_o \text{ dla } x = 0$$

nastąpującą postać:

$$\frac{C/x/}{C_o} = \frac{4\,a\,\exp /-\frac{u.L}{2D_x}/}{/1+a/^2 \exp /\frac{a}{2}\,\frac{u.L}{D_x}/ - /1-a/^2 \exp /-\frac{a}{2}\,\frac{u.L}{D_x}/} \qquad /7/$$

$$a = \left[1 + 4K \,.\, \frac{L}{\bar{u}} \,.\, /\frac{D_x}{u.L}/ \right]^{1/2} \qquad /8/$$

gdzie:

$C/x/$ - stężenie zawiesin w przekroju x, $g.m^{-3}$,

D_x - wzdłużny współczynnik dysperesji zawiesin, $m^2.s^{-1}$,

C_o - stężenie zawiesin w przekroju x = 0, $g.m^{-3}$,

L - całkowita długość odcinka rzeki, m,

u - średnia prędkość adwekcyjna, $m.s^{-1}$,

K - współczynnik szybkości zaniku zawiesin w odcinku rzeki, s^{-1},

t_1 - średni czas przepływu wody przez badany odcinek rzeki, s.

Ponieważ z uwagi na odbiornik zawiesin, tj. zbiornik Goczałkowice, istotniejsza jest informacja o wprowadzanej masie zawiesin niż o stężeniach, opracowano procedurę obliczenia ładunków zawiesin.

Mimo założenia o stałości stężeń zawiesin w przekroju początkowym odcinka rzeki w czasie trwania wezbrania, ładunek zawiesin w przekroju końcowym będzie zmienny w czasie z uwagi na jego związek z natężeniem

przepływu, którego zmiany mają charakter dynamiczny. Ładunki zawiesin obliczono według następującego wzoru:

$$\ell_o/t/ = \sum_{i=0}^{Int/-\frac{t}{\Delta t}/} Q_o/i.\ t/\ C/i.\Delta t/\ \Delta t \qquad /9/$$

w którym:

Δt - przyrost czasowy, godz.,

$Q_o/i.\Delta t/$ - natężenie przepływu obliczane dla kolejnych przyrostów czasowych według równania /5/,

$C/i.\Delta t/$ - stężenie zawiesin obliczane dla kolejnych przyrostów czasowych według równań /7/ i /8/.

5. Przykład numeryczny

W oparciu o wyniki pomiarów fali wezbraniowej, obserwowanej w dniach 23-25.09.1984 r. w badanym odcinku, rzeki Wisły, wyznaczono wartości parametrów doświadczalnych modelu, tj. K_x, D_x i K.

Przy użyciu maszyny cyfrowej przeprowadzono obliczenia propagacji fali wezbraniowej i ładunków zawiesin w rzece Wiśle na odcinku Skoczów-Drogomyśl.

Dane wejściowe do obliczeń były następujące:

t = 3 godziny

L = 9080 m

K_x = 15000 $m^2.s^{-1}$

$\bar{u}$ = 1,2 $m.s^{-1}$

D_x = 4,74 . 10^6 $m^2.s^{-1}$

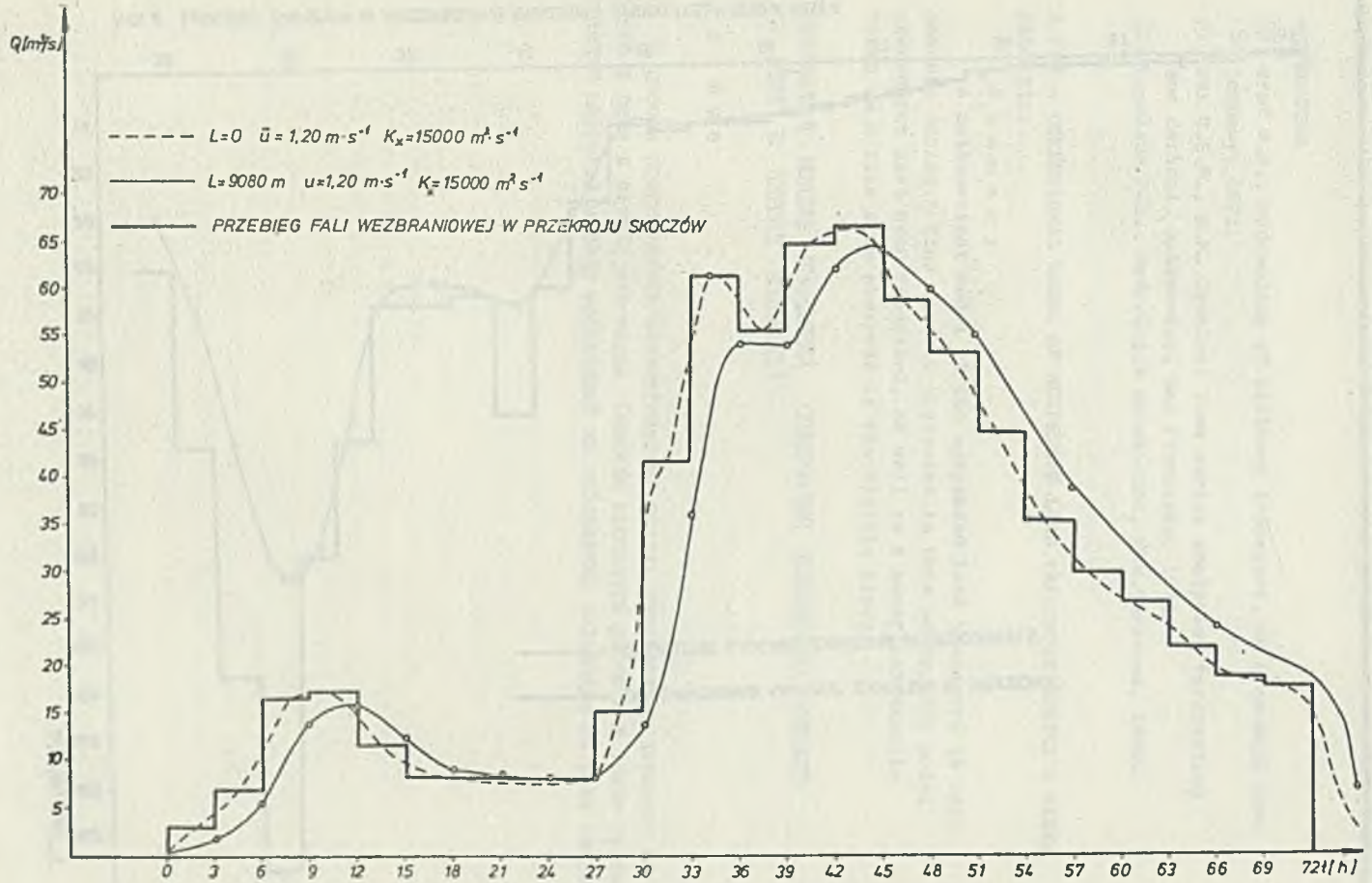
K = 0,01 $godz.^{-1}$

Wyniki obliczeń propagacji fali wezbraniowej przedstawiono na rys.1. Obliczony hydrogram przepływu w przekroju Drogomyśl wykazuje ok. 1-godzinne opóźnienie w stosunku do czasu przejścia fali w przekroju Skoczów. Kształt fali uległ oczekiwanemu spłaszczeniu, a uzyskane wartości natężeń przepływu uznano za realne, zważywszy stosunkowo niewielką długość badanego odcinka rzeki Wisły.

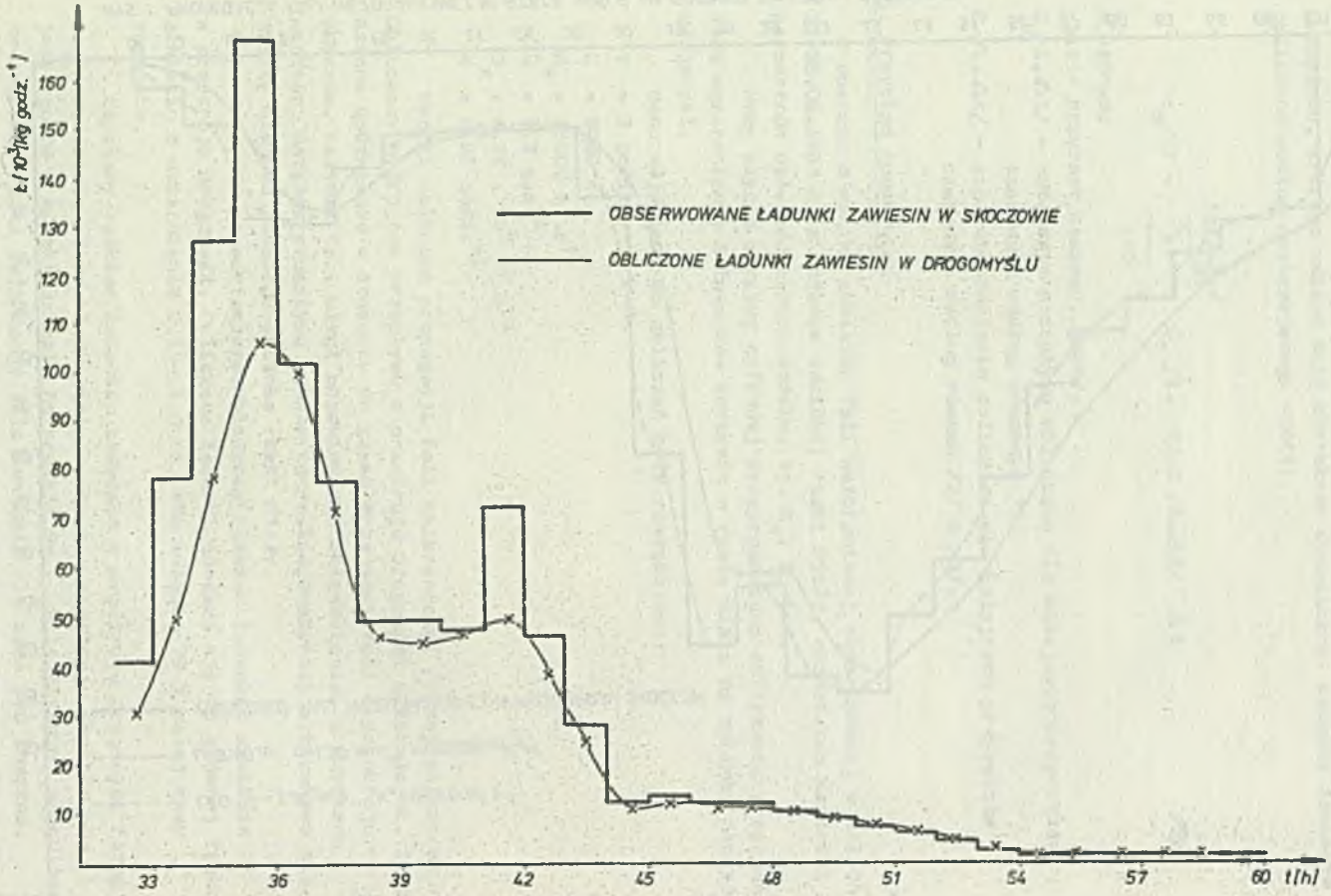
Na rys.2 przedstawiono obliczony rozkład ładunków zawiesin w przekroju Drogomyśl. Obliczone ładunki odnoszą się do głównej frakcji zawiesin o uziarnieniu 0,1 - 1,0 mm, stanowiącej 79 % całej masy zawiesin.

Uzyskany rozkład ładunków zawiesin w przekroju Drogomyśl różni się nieznacznie od rozkładu obserwowanego w przekroju Skoczów, co jest zgodne z oczekiwaniami. Na krótkim 9- kilometrowym, uregulowanym odcinku rzeki deformacja fali zawiesin nie może być znaczna.

W chwili obecnej w ramach Programu Rządowego PR7 Kierunek 01 trwają prace nad pełną weryfikacją przedstawionego modelu.



RYS. 1 PROPAGACJA FALI WEZBRANIOWEJ W RZECE WIŚLE NA ODCINKU SKOCZÓW - DROGOMYŚL



RYS.2 ŁADUNKI ZAWIESIN W PRZEKROJACH SKOCZÓW I DROGOMYŚL - RZEKA WISŁA

LITERATURA

[1] Graf W.H.: Hydraulics of sediment transport, Mc Graw-Hill Book Company, 1971.

[2] Box G.E.P., G.M. Jenkins: Time series analysis, forecasting and control, Halden-Bay, San Francisko, 1970.

[3] Eagelson P.S.: Hydrologia dynamiczna, PWN, Warszawa, 1978.

A ONE - DIMENSIONAL MODEL OF SUSPENDED LOAD TRANSPORT DURING A RIVER FLOW RISE

S u m m a r y

A mathematical model of the suspended load transport in open channel during a flow rise is presented in this paper. The model procedures have been described, as well as a numerical example based on a flow rise observed in the Vistula River.

ОДНОМЕРНАЯ МОДЕЛЬ ИЗМЕНЕНИЙ СОДЕРЖАНИЯ ВЗВЕШЕННЫХ ВЕЩЕСТВ В РЕКЕ В ПЕРИОД ПОЛОВОДЬЯ

Р е з ю м е

В работе представлена математическая модель изменения содержания веществ в реке в период половодья. Описаны процедуры расчёта а также представлен цифровой пример основанный на наблюдении половодья на реке Висле.