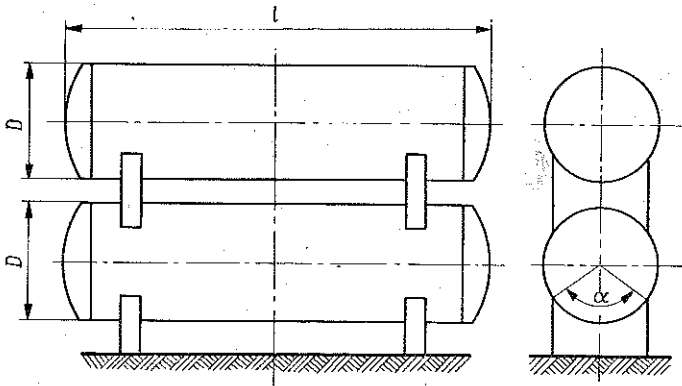


BADANIE NOŚNOŚCI ZBIORNIKÓW OPARTYCH NA SIODLACH

TADEUSZ KACPERSKI (WARSZAWA)

WSTĘP

W wielu przemysłach, a przede wszystkim w browarach, przetwórnictwie owocowym oraz w przemyśle chemicznym stosuje się zbiorniki na ciecze, ustawione w układzie piętrowym i oparte na tzw. siodłach (rys. 1). Prosta konstrukcja oraz łatwość montażu i demontażu tych naczyń jest zazwyczaj argumentem decydującym o wyborze takiego właśnie sposobu podparcia. Przy stosowanym w praktyce stosunku średnicy do długości zbiornika w granicach $D/l=1/1$ do $1/5$ opiera się je na dwu

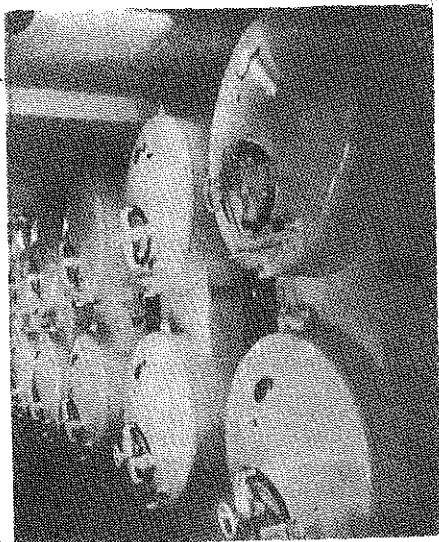


Rys. 1

siodłach. Oczywiście, najkorzystniej jest umieszczać podpory w płaszczyznach den. W wielu przypadkach konstruktor zmuszony jest umieszczać siodła podpierające w pewnej odległości od końców zbiornika. Odległość ta podyktowana jest najczęściej takimi względami jak szerokość stopy fundamentowej ściany budynku, która nie może być obciążona momentem pochodzącym od nacisku siodła, rozstawieniem stropowych belek nośnych budynku lub też rozmieszczeniem armatury na zbiorniku. Tak ustawione naczynia ilustruje rys. 2.

Wpływ rozstawienia siodła na nośność zbiorników jest bardzo istotny lecz dotychczas niezbadany. Konstruktor, decydując się na odsunięcie siodła od den na pewną odległość z powodów wyżej wspomnianych, powinien zdawać sobie sprawę,

jakie zmniejszenie nośności spowoduje to odsunięcie. Autorowi wyznaczono zajęcie się tym zagadnieniem w ramach prac badawczych o szerszym zasięgu w wieloosobowej grupie w Politechnice Warszawskiej.

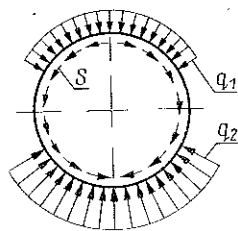


Rys. 2

naprężeń pochodzących od zginania całego zbiornika jako zamkniętego odcinka rury wypełnionej cieczą. Do uproszczenia tego upoważnia fakt, że naprężenia w obszarach powłoki dostatecznie oddalonej od podpór, a nawet w środku długości tak zaprojektowanego zbiornika, są małe w porównaniu z naprężeniami występującymi pod siodłami oraz w ich pobliżu.

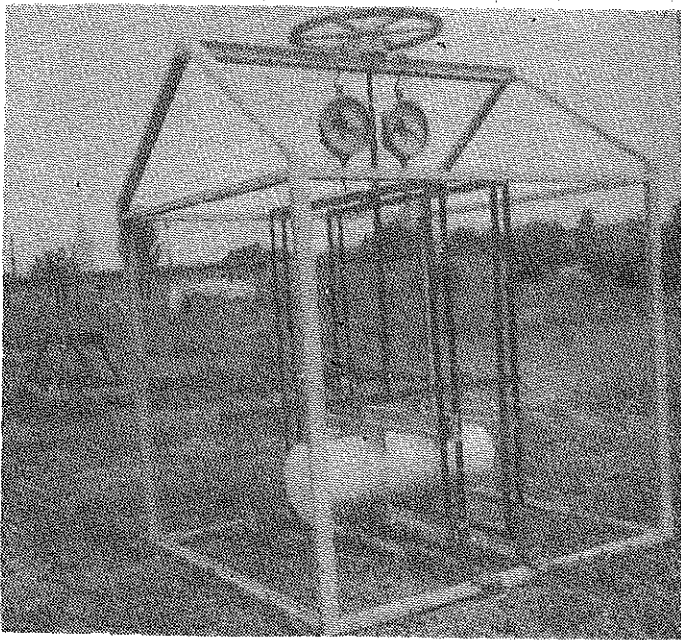
W celu wstępnego określenia mechanizmu zniszczenia oraz wpływu rozstawienia podpór na nośność graniczną zbiorników zbadano modele wykonane z kartonu. Badania te miały charakter pomocniczy. Pozwoliły one na jakościowe oszacowanie zjawiska oraz na ustalenie ekonomiczniejszego i bardziej wnikliwego programu badań modeli metalowych przez wyeliminowanie doświadczeń nie prowadzących do uzyskania istotnych wyników. Otrzymano również informację, które fragmenty płaszcza zbiornika wymagają większej liczby pomiarów. Duża liczba wykonanych prób oraz analiza zachowania się modeli przy różnym rozstawieniu podpór doprowadziła do uogólnień, które potwierdziły się w późniejszych badaniach zbiorników stalowych. Na urządzeniu przedstawionym na rys. 4 zbadano kilkadziesiąt modeli. Przez wywieranie nacisku na symetrycznie ustawione siodła doprowadzano modele do zniszczenia. Każdemu położeniu siodła na płaszczu odpowiadała inna siła niszcząca. Największa występowała przy ustawieniu siodła w płaszczyznach den i malała w miarę jak siodła ustawiane były coraz bliżej siebie. Na podstawie

Zbiorniki ustawiane są zazwyczaj w dwu i trzech warstwach. Schemat obciążenia zbiornika w płaszczyźnie podpór pokazany jest na rys. 3. W zależności od liczby naczyń ustawionych nad zbiornikiem badanym stosunek wielkości nacisku siodła dolnego do wielkości nacisku siodła górnego ulega zmianie. Różnica tych obciążeń maleje wraz ze wzrostem liczby naczyń nad zbiornikiem analizowanym. W celu ustalenia wpływu rozstawienia siodła na nośność zbiorników przeprowadzono doświadczenia na modelach. Ponieważ przy badaniach modeli trudno jest zrealizować takie niesymetryczne obciążenie, przeto wprowadzono uproszczenie polegające na przyjęciu $q_1 = q_2$. Do badań brana będzie pod uwagę wartość q_2 jako większa. Dalsze uproszczenie polega na pominięciu



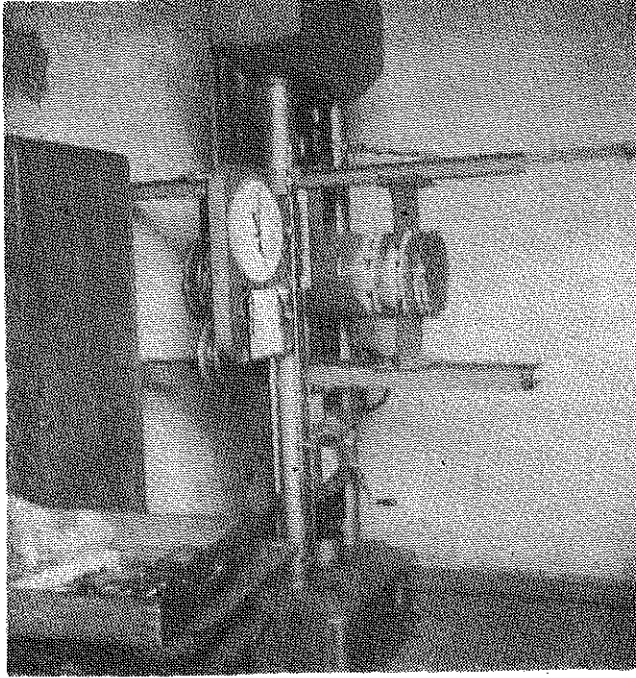
Rys. 3

tych zależności sporządzono wykresy. Charakterystyczny okazał się fakt, że w obszarach przylegających do den niewielka zmiana położenia siodeł w kierunku środka płaszcza powodowała gwałtowny spadek nośności. Przy odległości siodeł od den zbliżonej do $a=D/3$ spadek nośności zaczynał przebiegać mniej gwałtownie, lecz występował do końca długości przestrzeni pomiarowej. Wyniki pomiarów wykazały, że zależność granicznej nośności od położenia siodeł ma charakter podobny dla wszystkich serii zbadanych modeli. Obserwacje zachowania się modeli kartonowych w czasie doświadczeń oraz analiza pomiarów ujętych w wykresy pozwoliły na racjonalne zaprojektowanie kosztownych badań modeli stalowych w ramach środków finansowych jakimi dysponowano. Następnie przystąpiono do zbadania kilku serii modeli wykonanych z blachy stalowej St3Sx. Zbadano modele o średnicach 200, 300, 400 i 600 mm. Dla większości badań przyjęto grubość blachy $g=D/400$. Modele posiadały dna stożkowe o kącie nachylenia tworzącej stożka do podstawy 10° . Kąt opasania płaszcza modelu przez siodło wynosił 120° . Wartości te zostały ustalone w innym etapie badań i uznane jako optymalne.

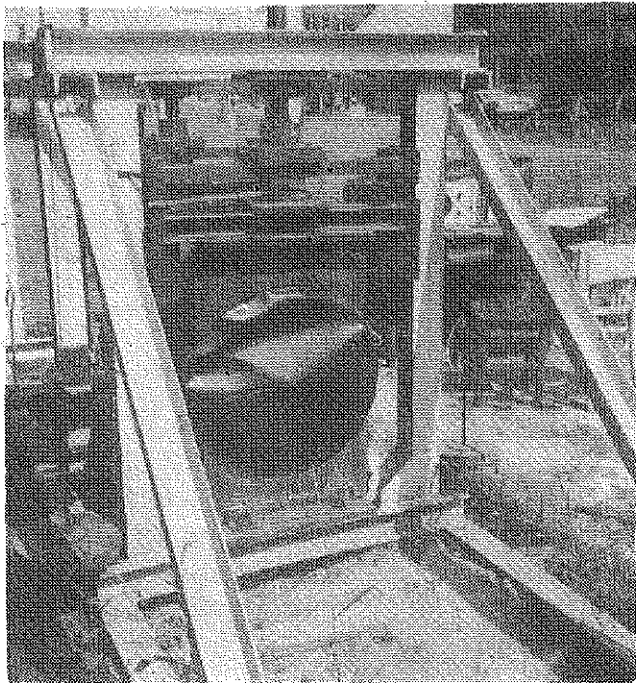


Rys. 4

Po przeanalizowaniu doświadczeń wykonanych na kilku seriach modeli stalowych o wymienionych wymiarach przystąpiono do przeprowadzenia prób niszczących na zbiornikach o średnicach 1200 i 1600 mm z dnami elipsoidalnymi. Ponadto zbadano zbiorniki o wymiarach $D=3000$ mm i $L=14\,500$ mm ustawione jeden na drugim przy położeniu siodeł w płaszczyźnie den. Modele zbadano na urządzeniach przedstawionych na rys. 4, 5 i 6.



Rys. 5



Rys. 6

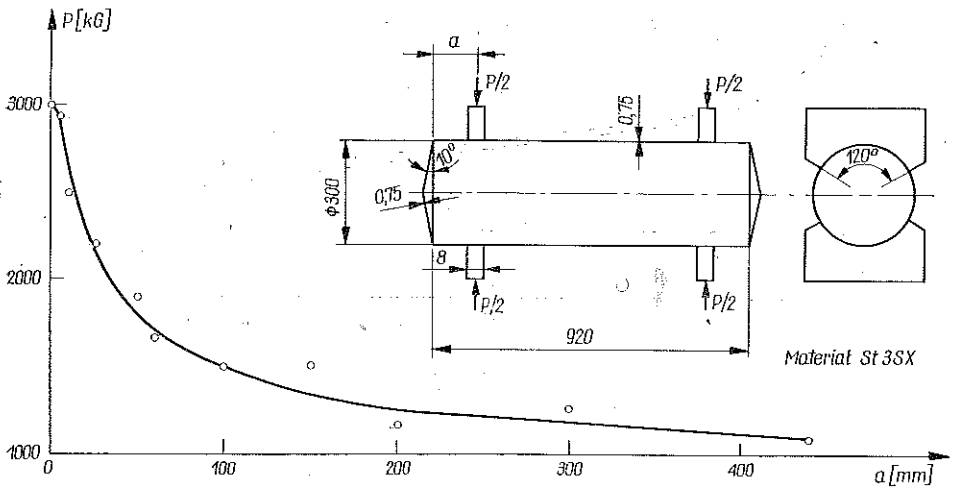
WYNIKI BADAŃ

Badając modele z kartonu a następnie stalowe z dnami stożkowymi udało się zaobserwować i wyodrębnić trzy różne mechanizmy zniszczenia, odnoszące się do momentu wyczerpania nośności.

Mechanizm pierwszy polega na utracie stateczności den. Zniszczenie dna następuje wzdłuż cięciwy łączącej końce siodła. Ten rodzaj zniszczenia występuje przy ustawieniu siodła na krawędziach zbiornika.

Przy położeniu siodła na płaszczu w pewnej odległości od den, zawierającej się w granicach połowy średnicy modelu, pojawia się drugi rodzaj zniszczenia. Następują lokalne wgniecenia płaszczu połączone z pofalowaniem powierzchni, do której przylegały siodła.

Trzeci mechanizm zniszczenia występuje przy położeniu siodła w odległości od den, przekraczającej wielkość promienia płaszczu i daje się zaobserwować do końca przestrzeni pomiarowej w kierunku środka długości tworzącej walca. W początkowej fazie polega on na niewielkich lokalnych wgnieceniach oraz na pofalowaniu płaszczu pod siodłami, a następnie na ogólnej utracie stateczności modelu.

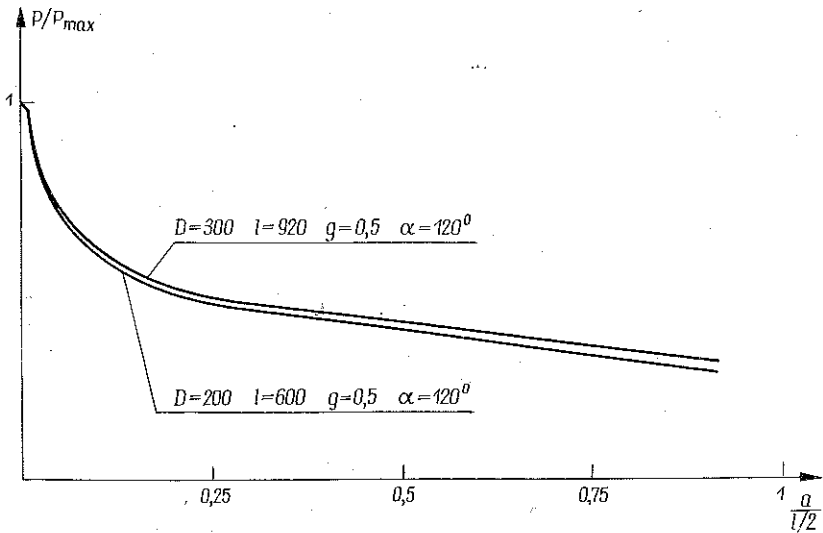


Rys. 7

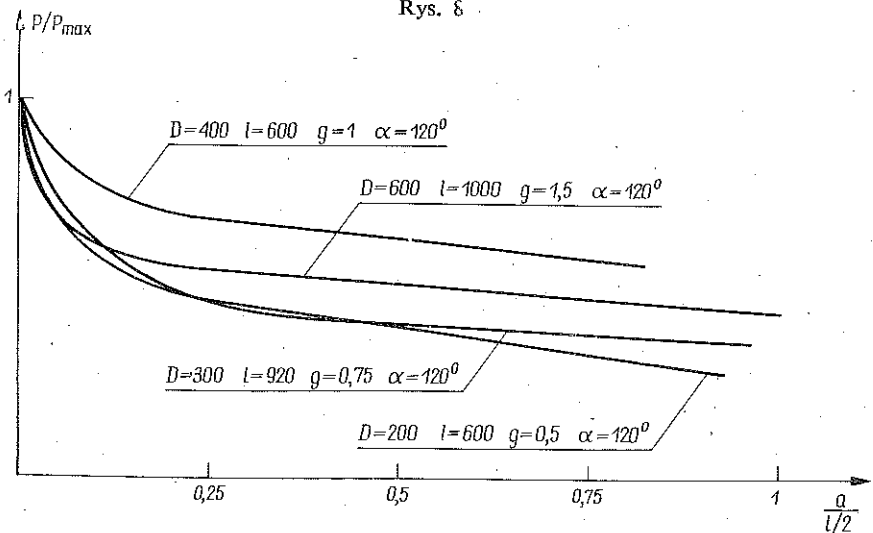
Po przeprowadzeniu szeregu prób na modelach z dnami tłoczonymi elipsoidalnymi stwierdzono występowanie tylko drugiego i trzeciego rodzaju mechanizmu zniszczenia. Odległość walcowej części dna od jego elipsoidalnej czaszy wyznaczona jest przez promień wyoblenia. Odległość ta powoduje, że przy ustawieniu siodła na walcowych częściach den, które w konstrukcji zbiornika stanowią przedłużenie płaszczu, wyczerpanie nośności następuje przez uplastycznienie tylko tych fragmentów den, do których przylegają siodła. Z tego względu badanie wpływu rozstawienia podpór na nośność zbiorników z dnami wypukłymi sprowadza się przede wszystkim do zbadania nośności części walcowej zbiornika, na którą składa się zasadniczo płaszcz oraz walcowe fragmenty dennic. Na rys. 7 przedstawiony jest dla przykładu jeden z wykresów stanowiących wynik pomiarów siły powodującej utratę nośności

modelu stalowego w zależności od położenia podpór na płaszczu. Interesujące są również przedstawione na rys. 8 dwa wykresy, charakteryzujące się dużym podobieństwem, sporządzone na podstawie wyników badań dwu serii modeli o zbliżonych proporcjach wymiarów gabarytowych i wykonanych z jednakowego gatunku blachy o identycznej grubości. Wykresy te zostały sporządzone we współrzędnych bezwymiarowych, przy czym P_{\max} jest siłą niszczącą, występującą przy ustawieniu siodeł na końcach modeli; P oznacza siłę powodującą utratę stateczności przy ustawieniu podpór w odległości a od den; l oznacza długość płaszczu zbiornika.

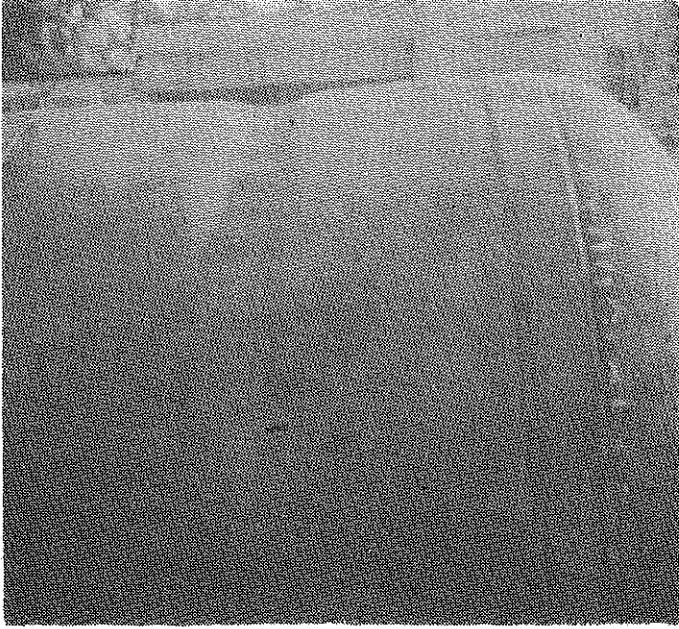
Rysunek 9 przedstawia zależność $P/P_{\max} = f[a/(l/2)]$ dla modeli o różnych wymiarach gabarytowych i różnych proporcjach D/l przy zachowaniu grubości blachy $g = D/400$;



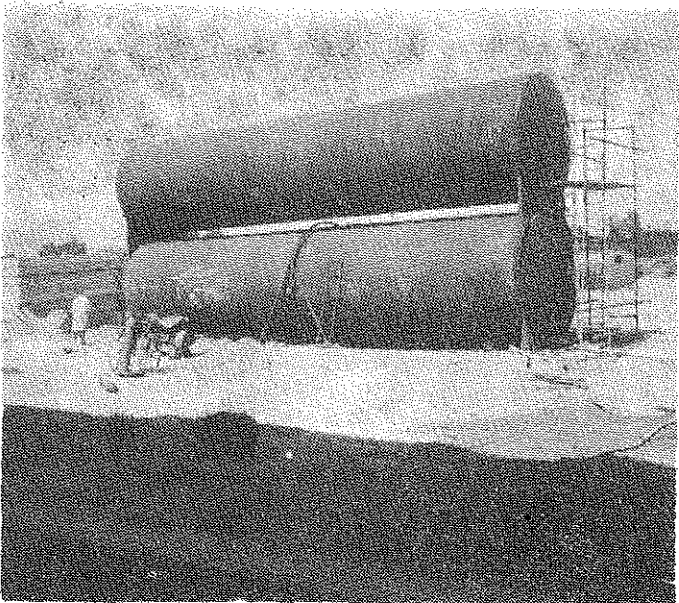
Rys. 8



Rys. 9



Rys. 10



Rys. 11

Na rys. 10 pokazany jest fragment płaszcza zbiornika o średnicy 1600 mm z charakterystycznym wgnieceniem i pofalowaniem płaszcza w miejscu, do którego przylegało siodło. Przedstawione na rys. 11 zbiorniki posiadają średnicę $D=3000$ mm i długość $l=14\,500$ mm, grubość płaszcza 10 mm i grubość den 12 mm. Ciężar zbiorników po napełnieniu ich wodą wynosił około 236 000 kG. Siodła podpierające umieszczone są na częściach cylindrycznych dennic. Dokonano pomiaru naprężeń i odkształceń zbiornika dolnego jako bardziej obciążonego reakcją siodel. Największe naprężenia rozciągające wystąpiły w obszarze płaszcza w okolicy siodel dolnych, nie przekraczając 900 kG/cm^2 . Natomiast w środku długości dolnej części płaszcza pojawiły się naprężenia rozciągające rzędu 100 kG/cm^2 . Zmierzona w dolnej części zbiornika strzałka ugięcia nie przekroczyła 4 mm.

WNIOSKI

Wszystkie serie zbadanych zbiorników wykazały, że siła powodująca utratę stateczności płaszcza ściskanego siodłami maleje bardzo gwałtownie przy niewielkim odsunięciu ich od den. Spadek wartości tej siły zaczyna przebiegać mniej gwałtownie przy umieszczeniu podpór w odległości od den $a > D/3$. Charakter zmiany nośności zbiorników w zależności od położenia siodel na płaszczu okazał się podobny dla wszystkich zbadanych serii modeli. Po zakończonym obecnie etapie badań zaobserwowane i omówione mechanizmy zniszczenia płaszczy zbiorników charakteryzują się dużym podobieństwem. Ponieważ budowa zbiorników ustawianych na siodłach jest rozpowszechniona, przeto warto odnotować uzyskane wyniki. Do czasu zakończenia opracowywanej obecnie teorii, opisującej zbadane zjawiska, rezultaty omówionych doświadczeń mogą ułatwić pogląd na pracę tego rodzaju ustrojów konstrukcyjnych.

LITERATURA

1. P. P. BIARD, *Stresses from radial loads in cylindrical pressure vessels*, Welding J. Research Supplement, **33**, 12, 1954.
2. K. GIRKMANN, *Dźwigary powierzchniowe*, PWN, Warszawa 1967.
3. A. П. Гольденвейзер, *Теория упругих тонких оболочек*, Москва 1953.
4. W. FLÜGGE, *Stresses in shells*, Springer-Verlag, Berlin 1960.
5. H. LUNDGREN, *Powłoki walcowe*, PWN, Warszawa 1963.
6. P. D. PATEL, R. F. MELWORM, I. BERMAN, *Solutions for distributed loads on long cylinders*, Trans. ASME, **91**, 3, 1969.
7. P. SEID, *On the bending of circular cylindrical shells by equal and equally spaced and radial shear forces and moments*, Trans. ASME, **28**, 1, 1961.
8. W. Y. SHAO, *Thin cylindrical shells subjected to concentrated loads*, Quart. Appl. Math., **4**, 1, 1946.
9. S. TIMOSHENKO, WOJNOWSKY-KRIEGER, *Teoria płyt i powłok*, Warszawa 1963.
10. S. W. YUAN, L. TING, *On radial deflections of a cylinder subjected to equal and opposite concentrated radial loads*, J. Appl. Mech., **24**, 2, 1957.

Резюме

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ СОСУДОВ, ОПЕРТЫХ НА СЕДЛАХ

Обсуждаются результаты испытаний горизонтальных и двухэтажных сосудов, расположенных в так наз. седловинах. Представлен характер изменения несущей способности сосудов, в зависимости от расположения седел на оболочке. Доказано, что сила, вызывающая потерю устойчивости оболочки, сжимаемой седлами, сильно уменьшается, при небольшом увеличении расстояний седел от дна. Только после превышения определенного расстояния седел от дна, уменьшение значения этой силы происходит медленнее. Результаты проведенных опытов облегчают понимание работы конструкции этого рода. Ввиду широкого распространения на практике таких сосудов, результаты этих исследований могут быть весьма полезны.

SUMMARY

INVESTIGATION OF THE LOAD CAPACITY OF CONTAINERS IN SADDLES

A discussion of the results of experiments and the method of conducting them on models of horizontal, one-storied containers placed on what are called saddles. The character of the change of limiting load capacity of the containers is presented as depending on the position of the saddles on the jacket. It is shown that the force causing loss of stability in the jacket compressed by the saddles decreases very rapidly at a very small distance from the bottoms. Only after the saddles exceed a definite distance from the bottom does decrease of the values of this force begin to proceed more slowly.

The results of the investigations performed enable conclusions to be drawn concerning applications of this kind of structure.

As regards the widespread use of containers set up in this way the results of the tests discussed may be useful.

Praca została złożona w Redakcji dnia 10 kwietnia 1971 r.