

**ИЗЫСКАНИЕ, ПРОЕКТИРОВАНИЕ,
СТРОИТЕЛЬСТВО И МОНТАЖ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ**

УДК 621.86.06

**ВАРИАНТ ПРИМЕНЕНИЯ СЪЕМНОГО РЫЧАГА ЗАХВАТА
КАНТОВАНИЯ ЭЛЛИПСОИДНЫХ ДНИЩ КОРПУСНОГО
ОБОРУДОВАНИЯ АЭС**

П.Д. Кравченко^{*}, Ю.П. Косогова^{*}, М.А. Гашнева^{}, А.Ф. Ковалев^{***}**

^{*}Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», Волгодонск, Ростовская обл., Россия

^{**}филиал АО «АЭМ-технологии» «Атоммаш» в г. Волгодонск, Волгодонск, Ростовская обл., Россия

^{***}АО «Волгодонскатомэнергоремонт», Волгодонск, Ростовская обл., Россия

Представлен расчет на прочность и жесткость съемного захвата для перемещения и кантования эллипсоидных днищ корпусного оборудования. Предложенное конструктивное решение позволит снизить трудо- и материалоемкость технологической оснастки и отказаться от привариваемых грузозахватных и установочных элементов.

Ключевые слова: съемные грузозахватные устройства, кантование и перемещение, расчет на прочность, толщина захвата.

Поступила в редакцию 10.11.2020

После доработки 17.11.2020

Принята к публикации 24.11.2020

Технологический процесс сборочно-сварочных операций при изготовлении корпуса парогенератора ПГВ-1000 предусматривает применение привариваемых к эллипсоидным днищам грузозахватных и технологических установочных элементов с последующим их срезанием. Изготовление указанных элементов, приварка к днищам, последующее их удаление занимают достаточный период времени. Аналогичный процесс наблюдается и при изготовлении эллипсоидных днищ корпуса реактора ВВЭР-1000, работающего в первом контуре, характеризующемся наивысшем уровнем радиации [1-4]. В местах приварки и последующего срезания указанных элементов в корпусах эллипсоидных днищ могут образоваться зоны неравновесной структуры стали, образованной смесью металла днища, металла электродов, флюсов. Такое состояние может привести к появлению межкристаллитной коррозии и радиационного охрупчивания. Указанное явление за время эксплуатации корпусного реакторного оборудования ранее не наблюдалось, однако его появление не исключено. Кроме того, изготовление десятков и сотен грузозахватных и технологических установочных элементов является весьма трудоемкой и длительной технологической операцией, что невыгодно экономически [5-7]. В этом случае отказ от приварных элементов является целесообразным.

Обоснование контура рычага в плане

С целью оптимизации расхода материала (листовая прокатная сталь) и минимизации затрат на технологическую обработку принимаем схему рычага в виде двух полуколец толщиной 60 мм каждое, охватывающих крышку днища по наружной цилиндрической поверхности и шарнирно соединенных в точке А (рис 1.) Конструктивно рычаг представляет собой криволинейный стержень большой кривизны с геометрической осью в виде дуги окружности. Совместим геометрическую ось кольца с точкой приложения продольной силы (т. О) и центром шарнирного

соединения (т. А). В качестве точки отчета принимаем точку В, лежащую на нормали в середине цилиндрической части днища.

Чтобы определить положение центра окружности и её радиус, воспользуемся каноническим уравнением окружности (1):

$$(x - x_c)^2 + (y - y_c)^2 = R^2, \tag{1}$$

где x, y – координаты любой точки на окружности;
 x_c, y_c – координаты центра окружности (т. С);
 R – радиус окружности.

Выбираем начало координат x, y в точке приложения подъёмной силы: точка О (0, 0). Координаты центра оси поворота: точка А (670 мм, 250 мм). Принимаем координаты вспомогательной точки В (335 мм, 520 мм) (рис. 1).

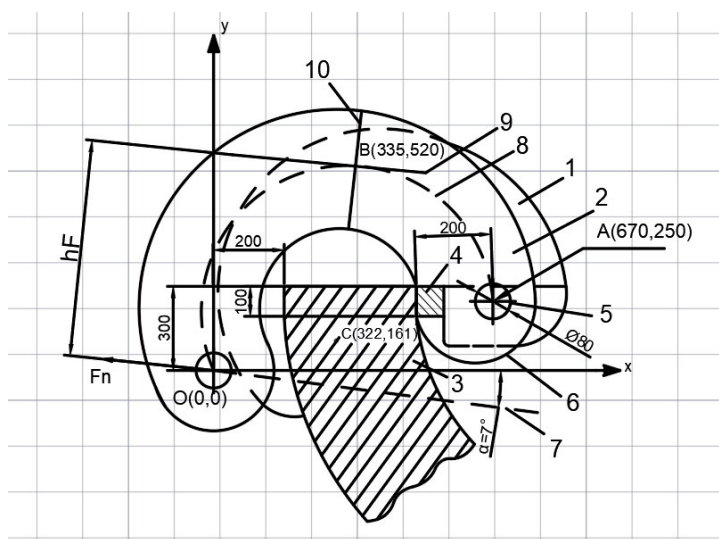


Рисунок 1 – Конструктивная схема захватного устройства: 1 – захват; 2 – рычаг; 3 – эллиптическое днище; 4 – вставка; 5 – ось вращения; 6 – кулачок (контактная поверхность рычага); 7 – силовая линия; 8 – геометрическая ось рычага; 9 – касательная к геометрической оси; 10 – поперечное сечение [Structural diagram of the gripper: 1 – gripper; 2 – lever; 3 – elliptical bottom; 4 – insert; 5 – axis of rotation; 6 – cam (contact surface of the lever); 7 – power line; 8 – geometric axis of the lever; 9 – tangent to the geometric axis; 10 – cross section]

Подставляя координаты точек О, А и В в уравнение 1 получаем систему алгебраических уравнений с тремя неизвестными:

$$\begin{cases} x_c^2 + y_c^2 = R^2, \\ (670 - x_c)^2 + (250 - y_c)^2 = R^2, \\ (335 - x_c)^2 + (520 - y_c)^2 = R^2. \end{cases}$$

Решая систему, находим: $x_c = 322$ мм; $y_c = 161$ мм; $R = 360$ мм.
 Для определения внутренних усилий в опасном сечении находим угол поворота днища в подвешенном состоянии:

$$\varphi = \arctg \frac{\frac{D_H}{2} + 200}{h_c - 300} = \arctg \frac{\frac{4652}{2} + 200}{600 - 300} = 83^\circ,$$

и угол между силовой линией и диаметральной плоскостью:

$$\alpha = 90^\circ - \varphi = 7^\circ.$$

Расчет на прочность рычага

Рычаг, как конструктивный элемент, шарнирно соединен с захватом, и служит для зажима кромки эллиптического днища реактора при его кантовании и перемещении к заданным технологическим позициям. Проводим касательную к геометрической оси, параллельную силовой плоскости (направлению силы F_n). Она практически совпала с точкой В. Восстанавливая перпендикуляр к касательной в точке В, получаем след опасного поперечного сечения.

Находим внутренние усилия в опасном сечении:

$N = F_n = G = 520$ кН – растягивающая продольная сила;

$M = F_n \cdot h = 520 \cdot 0,56 = 291$ кН·м – изгибающий момент, растягивающий внутренние волокна стержня.

Расчёт на прочность по нормальным напряжениям (подбор высоты сечения h)

Используя условие прочности кривого стержня большой кривизны, испытывающего изгиб с растяжением [9], получим формулу (2):

$$\frac{M \cdot h_B}{S_x \cdot R_B} + \frac{N}{A} \leq [\sigma], \quad (2)$$

где M – изгибающий момент в сечении;

N – продольная сила в сечении;

A – площадь поперечного сечения;

$S_x = Ae$ – статический момент площади относительно нейтральной оси сечения;

e – эксцентриситет, то есть расстояние между геометрической осью и нейтральной линией при чистом изгибе;

h_B – расстояние от нейтральной линии до внутренних волокон стержня;

R_B – радиус кривизны внутренних волокон стержня (рис. 2);

$[\sigma]$ – допускаемое напряжение стали при изгибе.

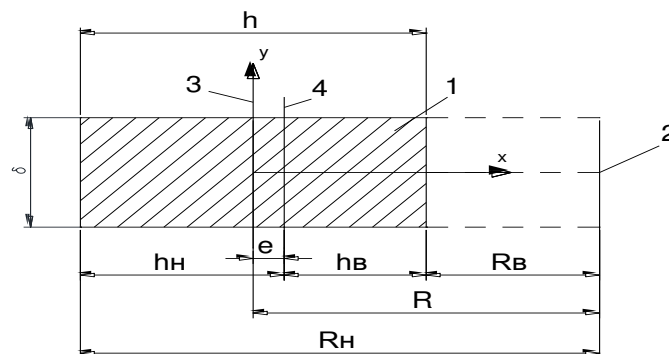


Рисунок 2 – Поперечное сечение кривого стержня большой кривизны: 1 – сечение стержня; 2 – центр кривизны нейтрального слоя; 3 – геометрическая ось сечения; 4 – нейтральная линия; e – эксцентриситет
[Cross-section of a curved bar of large curvature: 1 – bar section; 2 – center of curvature of the neutral layer; 3 – geometric axis of the section; 4 – neutral line; e – eccentricity]

Силовые параметры определены выше: $M=291$ кН·м; $N=520$ к Н.

Определяем площадь сечения:

$$A = \delta \cdot h = 120 h ;$$

эксцентриситет для прямоугольного сечения:

$$e = \frac{h^2}{12R} = \frac{h^2}{12 \cdot 360} = 0,000231 h^2 ;$$

статический момент площади сечения:

$$S_x = Ae = 120h \cdot 0,000231h^2 = 0,028h^3 ;$$

ордината внутреннего волокна:

$$h_B = \frac{h}{2} - e = 0,5h - 0,000231h^2 ;$$

радиус кривизны внутреннего волокна:

$$R_B = R - \frac{h}{2} = 360 - 0,5h.$$

Механические характеристики: принимаем высокопрочную легированную сталь 08X18H10T лист толстый ГОСТ 7350-77. Временное сопротивление $\sigma_{вр} = 509$ МПа. Коэффициент запаса прочности при расчете по временному сопротивлению $n=2,5$ [8]. Допускаемое напряжение $[\sigma] = \frac{\sigma_{вр}}{n} = 204$ МПа. Подставляем найденные параметры в условие прочности (формула 2):

$$\frac{2,91 \cdot 10^6(0,5h - 0,000231h^2)}{0,028h^3(360 - 0,5h)} + \frac{520 \cdot 10^3}{120h} \leq 204.$$

После упрощения получаем кубическое уравнение:

$$h^3 - 741h^2 - 8266h + 0,51 \cdot 10^8 = 0.$$

Оно имеет три действительных корня: $h_1 = 623$ мм; $h_2 = 351$ мм; $h_3 = -233$ мм. Принимаем наименьший положительный корень в качестве искомого решения: $h = h_2 \approx 350$ мм.

При найденной высоте сечения внутренняя цилиндрическая поверхность рычага не описывает контур днища, то есть заходит на внутренний угол сечения эллипсоида. Таким образом, данное решение технически некорректно.

Не изменяя исходных предпосылок (конструктивной схемы с заданными координатами опорных точек О и А), возможны два варианта уточнения решения. Первый вариант – изготовление рычага переменного сечения, то есть усложнение технологии обработки. Второй вариант – принять технологически допустимую высоту сечения h и найти требуемую толщину рычага δ .

Рассмотрим второй вариант, принимая $h = 300$ мм. Геометрические параметры сечения:

площадь сечения:

$$A = \delta \cdot h = 300\delta;$$

эксцентриситет:

$$e = R - h / \ln \frac{R_H}{R_B} = 360 - 300 / \ln \frac{510}{210} = 22 \text{ мм};$$

статический момент площади сечения:

$$S_x = Ae = 300\delta \cdot 22 = 6600\delta;$$

ордината внутреннего волокна:

$$h_b = \frac{h}{2} - e = 150 - 22 = 128 \text{ мм};$$

радиус кривизны внутреннего волокна:

$$R_b = R - \frac{h}{2} = 360 - 150 = 210 \text{ мм}.$$

Используем условие прочности (формула 2):

$$\frac{2,91 \cdot 10^6 \cdot 128}{6600\delta \cdot 210} + \frac{520 \cdot 10^3}{300\delta} \leq 204;$$

$$\delta \geq \frac{\left(\frac{2,91 \cdot 10^6 \cdot 128}{6600 \cdot 210} + \frac{520 \cdot 10^3}{300}\right)}{204} = 140 \text{ мм}.$$

Необходимо принять толщину листа $\delta_l = \frac{\delta}{2} = \frac{140}{2} = 70 \text{ мм}$.

Проверка прочности по контактным напряжениям

Воспользуемся условием прочности по контактным напряжениям:

$$\sigma_{max} \leq [\sigma]_k,$$

где σ_{max} – наибольшие по модулю напряжения в зоне контакта кулачка и цилиндрической части днища, $[\sigma]_k$ – допускаемое контактное напряжение, наибольшее напряжение определяем по табл. 60 [9]. С учётом того, что радиус цилиндрической части днища на порядок больше радиуса кулачка ($\frac{R_{цб}}{R_k} = \frac{2050}{150} \approx 14$) принимаем схему касания цилиндр – плоскость (рис. 3).

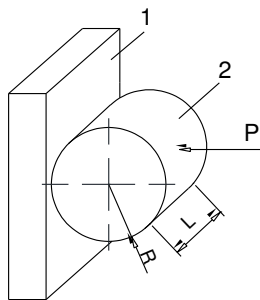


Рисунок 3 – Схема касания в зоне контакта: 1 – цилиндрическая кромка днища; 2 – кулачок рычага
[The scheme of tangency in the contact zone: 1 – cylindrical bottom edge; 2 – lever cam]

Наибольшее напряжение в этом случае при коэффициенте Пуассона для стали $\mu = 0,3$ определяем по формуле (3) [9]:

$$\sigma_{max} = 0,418 \cdot \sqrt{\frac{PE}{lR}}, \quad (3)$$

где E – модуль упругости первого рода. Принимая $P = F_n = 520 \text{ кН}$; $E = 2 \cdot 10^5 \text{ МПа}$; $l = 2\delta = 140 \text{ мм}$; $R = 150 \text{ мм}$, получаем:

$$\sigma_{max} = 0,418 \cdot \sqrt{\frac{520 \cdot 10^3 \cdot 2 \cdot 10^5}{140 \cdot 150}} = 930 \text{ МПа.}$$

Допускаемое напряжение для наибольшего напряжения в зоне контакта находим по формуле (4):

$$[\sigma]_к = \frac{1}{m} \cdot [\sigma], \quad (4)$$

где $[\sigma]$ – допускаемое напряжение при сжатии;

m – коэффициент, зависящий от отношения полуосей эллипса площадки контакта.

Для рассматриваемого случая при использовании 4-й теории прочности $m = 0,557$.
Находим допускаемое контактное напряжение:

$$[\sigma]_к = \frac{1}{0,557} \cdot 204 = 366 \text{ МПа.}$$

Подставляя в условие прочности, получаем $930 > 366$ – контактное напряжение в 2,5 раза превышает допускаемое, что приведёт к существенным пластическим деформациям в зоне соприкосновения кулачка и дна при отрыве последнего от основания. Устранить пластическую деформацию в месте контакта рычага с кромкой возможно при увеличении радиуса кулачка $R \rightarrow \infty$, то есть до плоскости (рис. 4).

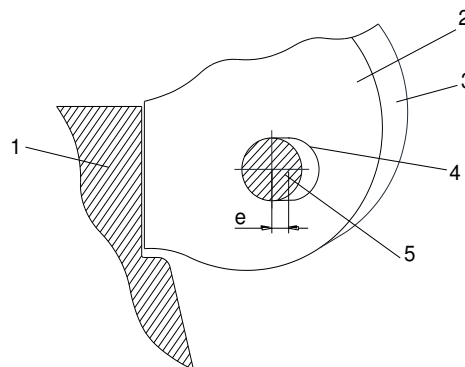


Рисунок 4 – Вариант конструкции рычага с плоской опорной поверхностью; 1 – кромка дна; 2 – рычаг; 3 – захват; 4 – паз в захвате; 5 – ось рычага; e – эксцентриситет [Lever design option with flat bearing surface; 1 – bottom edge; 2 – lever; 3 – capture; 4 – groove in the grip; 5 – axis of the lever; e – eccentricity]

Величина эксцентриситета определяется из условия сборки захватного устройства и ориентировочно составляет 3-5 мм. В этом случае контактное напряжение в месте контакта рычага с кромкой будет на порядок ниже величины напряжения по схеме контакта радиуса с плоскостью. Так как в новом варианте контакт происходит уже по поверхности, то производим расчет не контактных напряжений, а напряжений смятием. Под смятием понимается пластическая деформация, возникающая в соединениях на поверхности контакта. Возникающие при этом напряжения являются нормальными и их закон распределения по поверхности контакта достаточно сложен. Упрощая расчет, принимаем площадь опорной поверхности $A = 140 \cdot 100 = 14 \cdot 10^3 \text{ мм}^2$. Тогда напряжение смятия будет следующим:

$$\sigma_{см} = \frac{F}{A} = \frac{520 \cdot 10^3}{14 \cdot 10^3} = 37,14 \text{ МПа} < [\sigma_{см}] = 366 \text{ МПа.}$$

Таким образом, при использовании предложенного захватного устройства напряжение смятия на порядок меньше допускаемого напряжения.

Вышеприведенные допущения обоснованы согласно принципам расчетных обоснований в инженерных расчетах конструкций. На наш взгляд, применение съёмных грузозахватных устройств вместо используемых в настоящее время приварных, значительно упростит процессы кантования и перемещения эллипсоидных днищ корпусного оборудования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Margolin B.Z., Yurchenko V., Kostylev V.I., Morozov A.M., Varovin A.Y., Rogozkin S.V., Nikitin A.A.* Radiation embrittlement of support structure materials for WWER RPVS // Journal of nuclear materials. Elsevier Science Publishing Company, Inc. 2018. Vol. 508. P. 123-138.
2. *Protasov, A. V.* Modern development tendencies of ladle vacuum treatment / A. V. Protasov, B. A. Sivak // Тяжелое машиностроение. – 2019. – № 5-6. – С. 60-63.
3. *Абузов, А. В.* Автоматизация управления подъемно-транспортными механизмами при ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций / А. В. Абузов, Я. А. Абузов // Инженерный вестник Дона. – 2019. – № 7. – URL : ivdon.ru/magazine/archive/n7y2019/6104.
4. *Кравченко, П. Д.* Вариант конструктивного исполнения устройства точного позиционирования захвата для подъема упавших кассет в реакторе типа ВВЭР / П. Д. Кравченко, Д. Н. Федоренко, Ю. П. Косонова // Глобальная ядерная безопасность. – 2019. – № 1(30). – С. 101-105.
5. *Цовьянов, А. А.* Особенности термической обработки сварных соединений крупногабаритных агрегатов при монтаже АЭС / А. А. Цовьянов, Ю. Н. Кокорев, Д. В. Ходаков, Д. А. Пралиев // Сварочное производство. – 2014. – № 11. – С. 47-52.
6. *Боринцев, А. Б.* Влияние технологии изготовления патрубков крышки реактора типа ВВЭР-1000 на напряженно-деформированное состояние конструкции при эксплуатации / А. Б. Боринцев, В. Г. Федосов // Тяжелое машиностроение. – 2009. – № 1. – С. 2-5.
7. *Холопов, А. А.* Транспортировка и монтаж укрупненных элементов АЭС / А. А. Холопов, К. А. Дудкевич, Б. К. Пергаменщик // Вестник МГСУ. – 2010. – № 4-2. – С. 266-274.
8. *Кравченко, П. Д.* Расчетное обоснование способа применения съёмных грузозахватных устройств при перемещении эллипсоидных днищ корпусного оборудования АЭС / П. Д. Кравченко, Ю. П. Косонова, С. Ф. Годунов, Т. В. Антонова, В. А. Леонов // Инженерный вестник Дона. – 2020. – № 1. – URL : http://ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_15_1_Kravchenko.pdf_37ffaf2207.pdf.
9. *Писаренко, Г. С.* Справочник по сопротивлению материалов / Г. С. Писаренко, А. П. Яковлев, В. В. Матвеев. – Киев : Наукова думка, 1988. – 736 с.

REFERENCES

- [1] Margolin B.Z., Yurchenko V., Kostylev V.I., Morozov A.M., Varovin A.Y., Rogozkin S.V., Nikitin A.A. Radiation Embrittlement of Support Structure Materials for WWER RPVS // Journal Of Nuclear Materials. Elsevier Science Publishing Company, Inc. 2018. Vol. 508. P. 123-138.
- [2] Protasov A.V., Sivak B.A. Modern Development Tendencies of Ladle Vacuum Treatment. Tjzheloe mashinostroenie [Heavy Engineering]. 2019. № 5-6. P. 60-63. (in Russian).
- [3] Abuzov A.V., Abuzov Ya.A. Avtomatizatsiya upravleniya pod"yemno-transportnymi mekhanizmami pri likvidatsii posledstviy chrezvychaynykh situatsiy [Automation of Control of Lifting and Transport Mechanisms in Emergency Response]. Inzenernyj vestnik Dona [Don Engineering News]. 2019. №7. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n7y2019/6104 (in Russian).
- [4] Kravchenko P. D., Fedorenko D.N., Kosogova Y.P. Variant konstruktivnogo ispolneniya ustroystva tochnogo pozitsionirovaniya zakhvata dlya pod"yema upavshikh kasset v reaktore tipa VVER [Design Version of The Device, Exact Positioning of the Gripper for Lifting the Fallen Cassettes in the Reactor of WWER Type]. Global'naya yadernaya bezopasnost' [Global Nuclear Safety]. 2019. №1(30). P. 101-105 (in Russian).
- [5] Cov'yanov A.A., Kokorev YU.N., Hodakov D.V., Praliev D.A. Osobennosti termicheskoy obrabotki svarnykh soyedineniy krupnogabaritnykh agregatov pri montazhe AES [Features of Heat Treatment of Welded Joints of Large-Sized Units during NPP Installation]. Svarochnoe proizvodstvo [Welding Production]. 2014. №11. P. 47-52 (in Russian).
- [6] Borincev A.B., Fedosov V.G. Vliyaniye tekhnologii izgotovleniya trubkov kryshki reaktora tipa VVER-1000 na napryazhenno-deformirovannoye sostoyaniye konstruksii pri ekspluatatsii

- [Influence of Manufacturing Technology for WWER-1000 Reactor Cover Pipes on the Stress-Strain State of the Structure during Operation]. Tyazheloe mashinostroenie [Heavy Engineering]. 2009. №1. P. 2-5 (in Russian).
- [7] Holopov A.A., Dudkevich K.A., Pergamenshchik B.K. Transportirovka i montazh ukрупnykh elementov AES [Transportation and Installation of the Integrated NPP Components]. Vestnik MGSU [MGSU Bulletin]. 2010. №4-2. P. 266-274 (in Russian).
- [8] Kravchenko P.D., Kosogova Yu.P., Godunov S.F., Antonova T.V., Leonov V.A. Raschetnoye obosnovaniye sposoba primeneniya s"yemnykh gruzozakhvatnykh ustroystv pri peremeshchenii ellipsoidnykh dnishch korpusnogo oborudovaniya AES [Calculation Justification of the Method of Using Removable Load-Lifting Devices when Moving Ellipsoid Bottoms of Nuclear Power Plant Hull Equipment]. Inženernyj vestnik Dona [Don Engineering News]. 2020. №1. URL: http://ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_15_1_Kravchenko.pdf_37ffaf2207.pdf (in Russian).
- [9] Pisarenko G.S., Yakovlev A.P., Matveev V.V. Spravochnik po soprotivleniyu materialov [Reference Book on the Resistance of Materials]. Kiev: Naukova dumka. 1988. 736 p. (in Russian).

A Variant of Application of Removable Lever for Turning Ellipsoid Bottoms of NPP Hull Equipment

P.D. Kravchenko ^{*1}, Y.P. Kosogova ^{**2}, M.A. Gashneva ^{***3}, A.F. Kovalev ^{****4}

^{*}Volgodonsk Engineering Technical Institute, the Branch of the National Research Nuclear University «MEPhI», Lenin St., 73/94, Volgodonsk, Rostov region, Russia 347360

^{**}branch of JSC AEM-technologies «Atomash» in Volgodonsk, Volgodonsk, Rostov region, Russia 347388

^{***}AO «Volgoenergoremont», Zhukovsky highway, 38, Volgodonsk, Rostov region, Russia 347388

¹e-mail: krapa21@yandex.ru

ORCID iD: 0000-0003-3437-9998

WoS Researcher ID: G-5279-2017

²e-mail: ypkosogova@mephi.ru

ORCID iD: 0000-0003-3952-7814

WoS ResearcherID: Y-4338-2018

³e-mail: marinagashneva82@mail.ru

⁴e-mail: kovalevaea12@mail.ru

Abstract – The paper present the calculation of the strength and rigidity of the removable gripper for moving and turning ellipsoid bottoms of hull equipment. The proposed design solution will reduce the labor and material consumption of technological equipment and eliminate the need for welded load-handling and installation elements.

Keywords: removable hoisting device, tilting and displacement, the calculation of the strength, grip thickness.