

ОСТОЙЧИВОСТЬ МАШИНЫ-АМФИБИИ ПРИ ДВИЖЕНИИ ПО ВОДЕ

Кладов Д.Ю.¹, Трифонова О.И.², Буренин В.В.³ Email: Kladov1135@scientifictext.ru

¹Кладов Денис Юрьевич – магистрант;

²Трифопова Ольга Игоревна – кандидат технических наук, доцент;

³Буренин Владислав Валентинович – кандидат технических наук, профессор,
кафедра транспортных установок,

Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет,
г. Москва

Аннотация: в статье рассматриваются особенности движения машины-амфибии по воде, применение амфибийных машин в мире, тенденции развития, а также использование машин-амфибий в гражданской и военной областях. Приведены основные зависимости положения машины от угла крена. Описаны основные принципы работы машины на воде. Показано влияние внешних факторов на угол крена. Даны определения статической и динамической устойчивости машины-амфибии при движении по воде. Описаны законы, по которым строятся графики статической и динамической устойчивости. Приведены формулы и рисунки для нахождения базовых точек, влияющих на устойчивость машины-амфибии. Сделаны выводы об исследовании.

Ключевые слова: водометный движитель, устойчивость, опрокидывающий момент, ватерлиния, метацентр, поперечный крен, машина-амфибия.

THE STABILITY OF AMPHIBIOUS VEHICLES WHEN MOVING ON THE WATER

Kladov D.Ju.¹, Trifonova O.I.², Burenin V.V.³

¹Kladov Denis Jur'evich – Undergraduate;

²Trifonova Olga Igorevna – PhD in Technical Sciences, Associate Professor;

³Burenin Vladislav Valentinovich – PhD in Technical Sciences, Full Professor,

DEPARTMENT OF TRANSPORT INSTALLATION,

MOSCOW STATE AUTOMOBILE AND ROAD TECHNICAL UNIVERSITY,

MOSCOW

Abstract: the article deals with the features of the movement of the amphibian machine in water. The use of amphibious machines in the world, the development trend, as well as the use of amphibious machines in civil and military fields. The main dependences of the machine position on the roll angle are given. The basic principles of the machine operation on water are described. The influence of external factors on the angle of heeling is shown. The definitions of the static and dynamic stability of the amphibian machine when moving along water are given. The laws describing the construction of static and dynamic stability graphs are described. The formulas and figures for finding the base points affecting the stability of the amphibian machine are given. Conclusions are drawn about the study.

Keywords: water-jet propulsion, stability, tipping point, line, metacenter, cross roll, amphibious machine.

УДК 629.122

К разрабатываемой машине-амфибии предъявляются общие и частные или специальные требования. Общие требования сводятся к обеспечению простоты конструкции, надежности, живучести, компактности, малых габаритных размеров, небольшой массы, простоты обслуживания и ремонта, экономичности. Специальные требования отражают особенности технического назначения машины и условий её эксплуатации.

Специальные машины-амфибии используются для транспортировки грузов в условиях полного бездорожья, для преодоления водных преград, для эвакуации раненых, оборудования переправ.

Создание современной автомобильной техники ставит перед конструкторами ряд больших и сложных задач. От их успешного решения зависит прогресс техники.

В современном мире наблюдается устойчивая тенденция большего использования машин-амфибий, передвигающихся как по воде, так и по суше. В основном эти машины применяются для решения военных задач. В гражданской сфере такую машину можно использовать для транспортировки людей через водные преграды, паромной переправы во время паводков, перевозки людей и грузов, а также в условиях катаклизмов, например, наводнения.



Рис. 1. Амфибийное транспортное средство

В машинах-амфибиях иностранных производителей, таких как Bonaí, Water Car, используются для движения по воде гребные винты. Однако [1] они имеют ряд недостатков:

- 1) Эффективность действия винта существенно снижается с изменением осадки машины-амфибии.
- 2) Винт может быть поломан вследствие удара его лопастей о камни, дно реки, затонувшие бревна.
- 3) Неуравновешенность винта может вызвать вибрацию.
- 4) Винт может работать в условиях кавитации, которая разрушает винт.

В связи с этим для обеспечения хода машины-амфибии по воде выбирается водометный движитель. Преимуществами этого движителя являются:

- 1) Защищенность от ударов лопастями о камни, дно реки, затонувшие бревна.
- 2) Возможность работать на мелководье.
- 3) Высокая энерговооруженность при ограниченной массе и габаритных размерах.
- 4) Возможность существенного увеличения оборотов гребного вала по сравнению с гребным винтом.

Из-за больших габаритных размеров и массы амфибийной машины во время поворотов на воде она может выйти из состояния равновесия и опрокинуться. Способность машины, выведенной из положения равновесия (отклонении) под воздействием внешних сил, вновь возвращаться в положение равновесия после прекращения действия внешних сил называется остойчивостью [2].

Продольным отклонением машины называется дифферент, поперечное отклонение – креном. Метацентр – центр кривизны траектории, по которой перемещается центр величины в процессе наклонения судна. Центр величины – центр тяжести вытесненного кораблем объема воды, иначе центр тяжести подводного объема корабля. Центр давления – точка, в которой линия действия равнодействующей, приложенных к покоящемуся или движущемуся телу сил давления окружающей среды, пересекается с некоторой проведенной в теле плоскостью. Расстояние по оси плавания между метацентром и центром тяжести называется начальной метацентрической высотой. Расстояние между метацентром и центром давления называется поперечным (или малым метацентрическим) радиусом. Остойчивость обеспечивает машине-амфибии возможность входить с суши в воду с креном и дифферентом, буксировать другую (однотипную машину) [2].

Установлено [3], что $M_b = PGZ$, где GZ – плечо остойчивости, являющееся катетом прямоугольного треугольника GMZ (Рис. 2).

Так как угол GMZ вследствие взаимной перпендикулярности сторон равен углу крена α , то

$$GZ = MG \cdot \sin\alpha. \quad (1)$$

Отсюда:

$$M_b = PMG \cdot \sin\alpha = Dh \cdot \sin\alpha; \quad (2)$$

где M_b – восстанавливающий момент при крене машины в поперечной плоскости;

P – вес машины, равный поддерживающей силе воды;

h – начальная поперечная метацентрическая высота;

α – угол крена.

Эта формула называется метацентрической формулой поперечной остойчивости машины.

Так как вес машины при крене не изменяется, то, очевидно, чем больше h , тем больше восстанавливающий момент, т.е. с увеличением метацентрической высоты увеличивается остойчивость машины. Поэтому величина h и является метацентрической мерой остойчивости.

Расстояние r между начальным метацентром и центром давления при крене, как указывалось выше, называется поперечным метацентрическим радиусом, который служит для определения остойчивости машины. Поперечный метацентрический радиус r , соответствующий заданной ватерлинии и заданной плоскости наклона, равен частному от деления момента инерции I площади действующей ватерлинии относительно центральной оси, перпендикулярной к плоскости, на объемное водоизмещение W машины соответствующее действующей ватерлинии [3]:

$$r = \frac{I}{W}. \quad (3)$$

Объемное водоизмещение W строго ограничено грузоподъемностью плавающей машины. Поэтому увеличение отношения $\frac{I}{W}$ возможно лишь при увеличении момента инерции I .

Момент инерции зависит от формы площади ватерлинии. Например, для ватерлинии прямоугольной формы при длине l и ширине b момент инерции определяется по формуле:

$$I = \frac{l \cdot b^3}{12}. \quad (4)$$

Следовательно, при данной длине ширина в значительной мере определяет остойчивость машины.

Однако ширина машины также ограничена (этого требуют условия перевозок по железной дороге). Поэтому на некоторых плавающих машинах для увеличения объема вытесняемой воды и остойчивости устанавливают боковые понтоны.

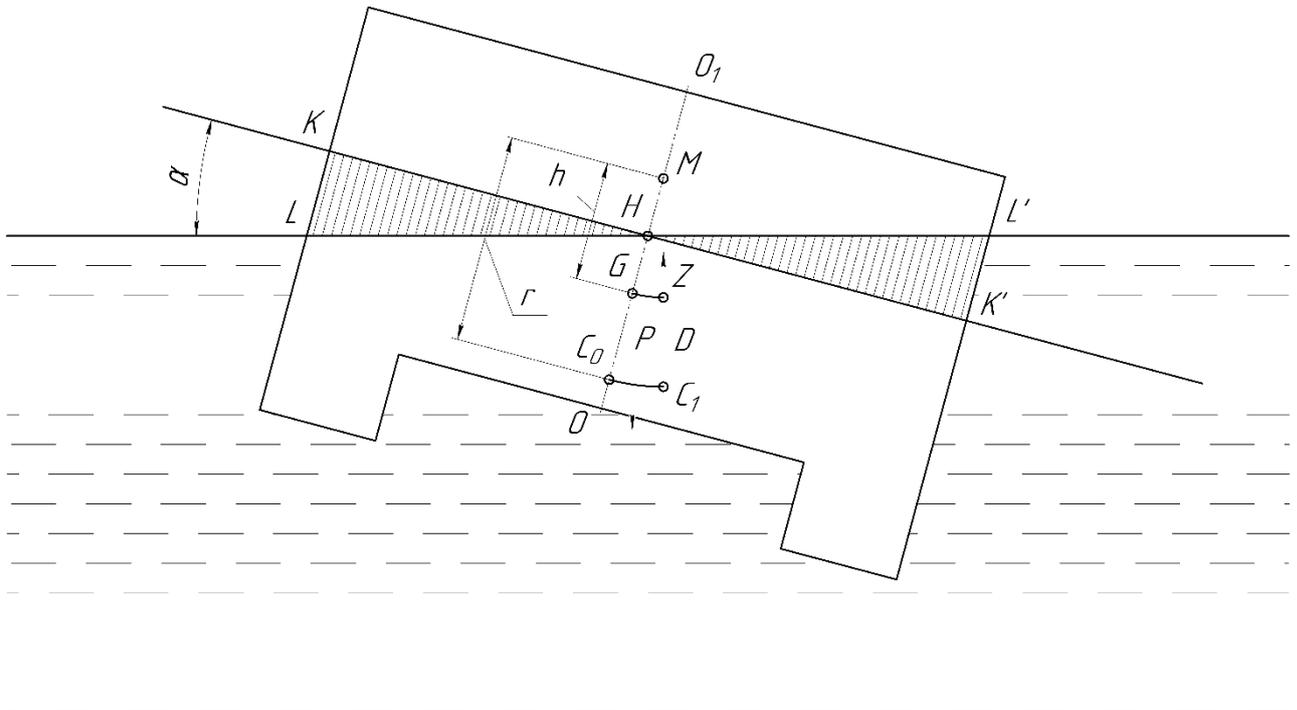


Рис. 2. Поперечная остойчивость машины-амфибии

H – центр тяжести машины; M – метацентр; C_0 – начальное положение центра давления; C_1 – новое положение центра давления; G – центр тяжести; GZ – восстанавливающее плечо; LL' – ватерлиния; KK' – ось машины; h – начальная поперечная метацентрическая высота; r – малый метацентр (поперечный радиус); P, D – пара сил.

Остойчивость бывает статическая и динамическая. Статическая остойчивость – рассматривается при действии статических сил, то есть приложенная сила не изменяется по величине. Динамическая остойчивость – рассматривается при действии изменяющихся (то есть динамических) сил, например, ветра, волнения моря, подвижки груза и т.п. [4]. Остойчивость машины по отношению к крену, называется поперечной, а по отношению к дифференту – продольной.

Известно, что независимо от положения машины-амфибии на нее действует две равные и противоположно направленные силы: вес машины (со всеми находящимися на ней грузами) и поддерживающая сила воды. При прямом положении машины-амфибии обе силы – вес и поддерживающая сила – будут на одной вертикальной прямой. При наклоне на борт центр давления (вследствие изменения формы объема вытесненной телом жидкости) сместится в сторону наклона. Центр

тяжести давления будут теперь не на одной вертикали. Поэтому силы, действующие в этих точках, не совпадут, а будут параллельны. Поскольку поддерживающая сила будет направлена вверх, а сила веса машины – вниз, то возникает выпрямляющая пара сил, стремящаяся вернуть машину в исходное положение.

Допустим, что под влиянием внешних сил, машина накренилась на некоторый угол α (рис. 3), часть её KLH вышла из воды, а часть $K'L'H$, наоборот, погрузилась в воду. При этом положение центра тяжести останется неизменным, потому что грузы в машине при ее крене не переместились; не изменилась и величина водоизмещения, так как объем вышедшего из воды клина KHL равен объему погруженного в воду клина $K'L'H$. Однако форма подводной части машины изменилась, а, следовательно, переместился и центр давления C_0 .

При малых кренах машины ($0 - 15^\circ$) допускают, что центр давления перемещается по дуге окружности. Следовательно, линия действия поддерживающей силы будет проходить через одну и ту же точку M (отрезок $C_0M=C_1M$ – радиус окружности).

Пусть новое положение центра давления будет C_1 . Силы P и D останутся перпендикулярными к ватерлинии LL' , но уже не будут направлены по одной прямой, а образуют пару с плечом GZ . Величина восстанавливающего момента будет равна $P \cdot GZ$, где GZ – плечо остойчивости.

Продолжим линию действия подъемной силы до пересечения с осью симметрии машины OO_1 . Полученная при пересечении точка M называется метацентром, а расстоянием по оси плавания между метацентром и центром тяжести – начальной поперечной метацентрической высотой (обозначается эта величина буквой h). Расстояние между метацентром и центром давления называется поперечным (или малым метацентром) радиусом и обозначается буквой g .

Таким образом, машина, плавающая на поверхности воды, имеет три характерные точки:

- центр тяжести, не меняющий своего положения при любом положении машины (если грузы не перемещаются);
- центр давления (водоизмещения), перемещающийся при крене и являющийся центром тяжести вытесненного машиной объема воды; положение центра давления по высоте машины зависит от осадки и формы обводов погруженного объема корпуса;
- метацентр, изменяющий свое положение в зависимости от крена.

Рассмотрим различные случаи расположения этих точек (Рис. 3).

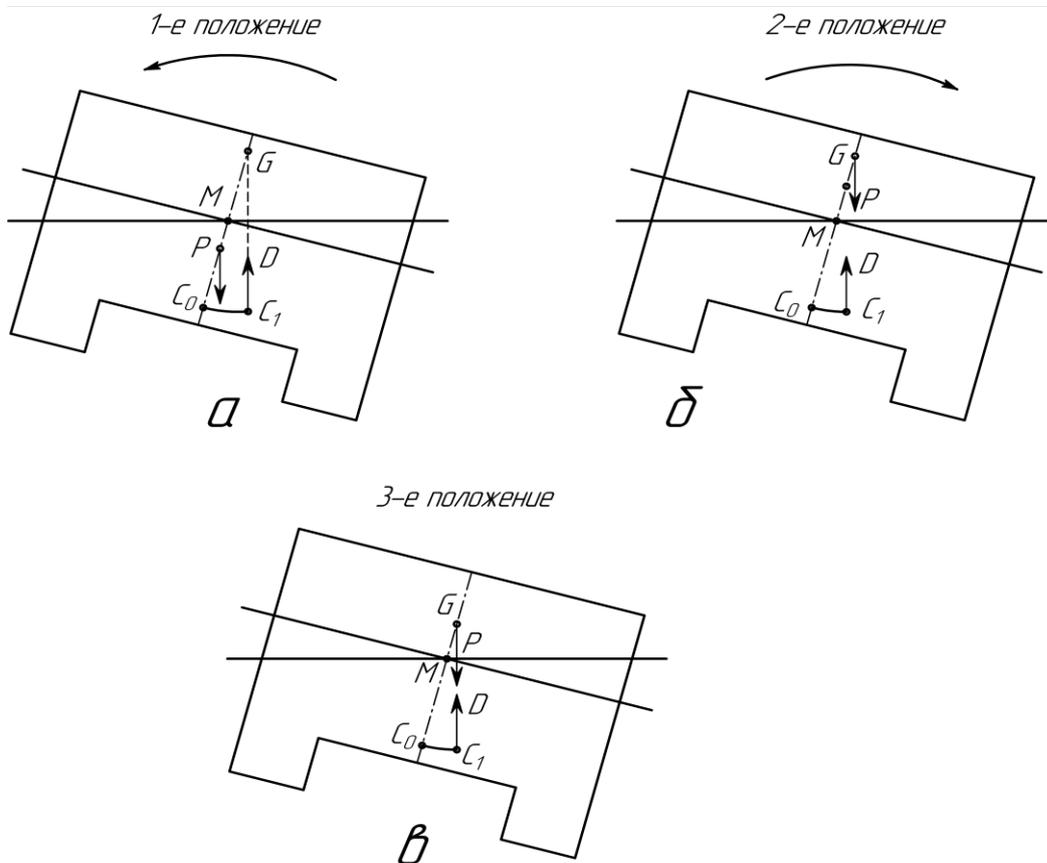


Рис. 3. Различные случаи расположения центра тяжести, центра давления и метацентра машины-амфибии при крене:

a – машина устойчива; *б* – машина неустойчива; *в* – положение машины безразличное; *М* – метациентр; *С0* – начальное положение центра давления; *С1* – новое положение центра давления; *G* – центр тяжести; *P*, *D* – пара сил

1-е положение (рис. 3 а). Машина устойчива: точка пересечения линии действия поддерживающей силы с диаметральной плоскостью (метациентр *М*) лежит выше центра тяжести машины. Восстанавливающий момент положительный: после устранения вызвавшей крен причины вес и поддерживающая сила стремятся вернуть машину в исходное (прямое) положение.

2-е положение (рис. 3 б). Машина неустойчива: точка пересечения линии действия поддерживающей силы с диаметральной плоскостью лежит ниже центра тяжести машины. В этом случае образовавшаяся пара сил будет стремиться увеличить крен машины.

3-е положение (рис. 3 в). Положение машины безразличное: метациентр совпадает с центром тяжести машины. Сила веса и поддерживающая сила лежат на одной вертикальной прямой. По прекращении действия кренящего момента машина в исходное положение не вернется, так как нет восстанавливающего момента.

Следовательно, если поперечный метациентр *М* выше центра тяжести *G*, то машина устойчива; если же поперечный метациентр ниже центра тяжести или совпадает с ним, то машина неустойчива.

Метацентрическая высота характеризует устойчивость машины при углах крена до 15°, при этом положение метациентра практически остается неизменным.

Для полного представления об устойчивости машины необходимо иметь данные об ее устойчивости при углах крена, превышающих 15°, особенно когда начинает обнажаться ходовая часть. В этом случае метацентрическую формулу устойчивости применять нельзя.

Кроме того, при проектировании машины необходимо определять максимальный предельный угол крена, при превышении которого машина опрокинется.

Результаты расчетов записываются и оформляются в виде диаграммы статической устойчивости машины (рис. 4), где по оси ординат откладывается плечо восстанавливающего момента, *l*, м, а по оси абсцисс угол крена машины-амфибии, α .

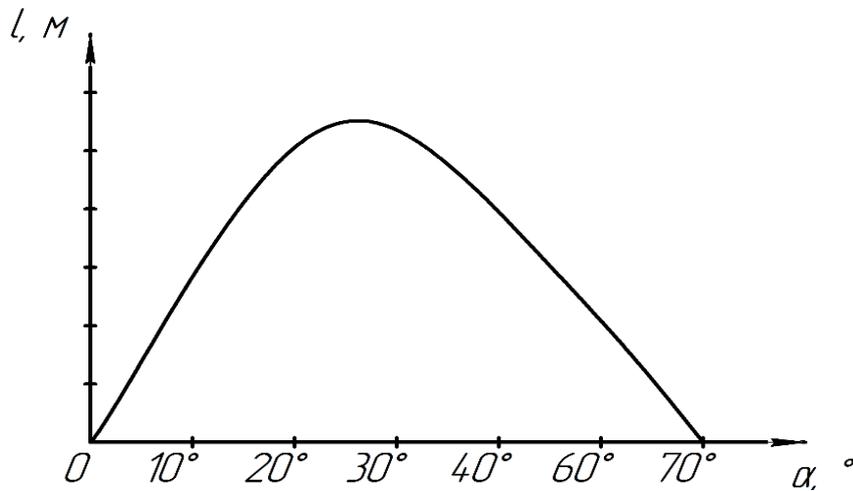


Рис. 4. График определения угла крена при статической устойчивости

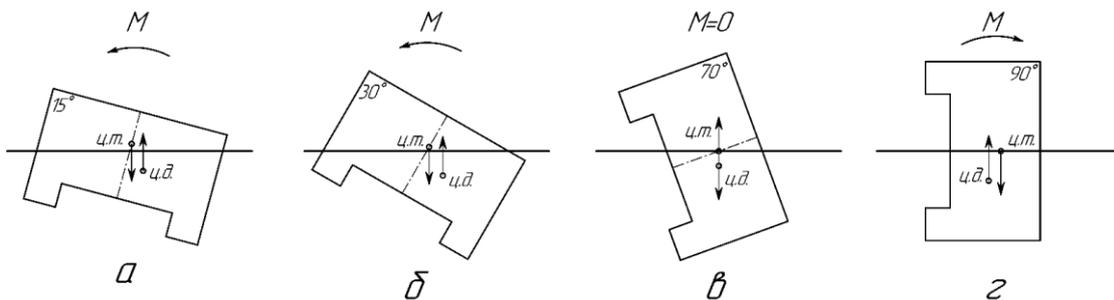


Рис. 5. Положение машины-амфибии при разных углах крена.

М – момент, действующий на машину-амфибию при угле крена:

a – 15°; *б* – 30°; *в* – 70°; *г* – 90°

Из диаграммы видно, что при малых углах крена на восходящей части диаграммы плечо устойчивости возрастает (пропорционально углу крена), а на нисходящей части – уменьшается. При

некотором угле (в данном случае при угле 70°) (рис. 5) плечо остойчивости становится равным нулю, т.е. наступает положение неустойчивого равновесия машины, когда векторы веса машины и поддерживающей силы воды лежат на одной прямой. При дальнейшем крене вес машины вместе с поддерживающей силой будет создавать опрокидывающий момент, под действием которого машина опрокинется.

При эксплуатации машины-амфибии на воде на нее действуют различные внешние силы, как статические, так и динамические. К последним можно отнести волны и силы, развивающиеся при поворотах, силу натяжения буксирного троса при буксировке машины-амфибии. При воздействии внешней силы опрокидывающие и восстанавливающие моменты не равны, вследствие чего плавающая машина начинает крениться и получает угловые ускорения. Достигнув угла крена, при котором восстанавливающий момент равен кренящему, и приобретая в этом положении максимальную угловую скорость, машина будет продолжать крениться и дальше, но замедленно, а когда работа кренящего момента станет равной работе восстанавливающего момента, крен прекратится, машина на мгновение остановится, а затем постепенно начнет возвращаться к нормальному положению, при котором угловая скорость будет равна нулю. Если действие кренящего момента продолжается, то колебание машины придет в состояние покоя, которое будет определяться углом крена. Поэтому при динамическом приложении кренящего момента для определения угла крена следует найти на диаграмме остойчивости такую точку, в которой работа кренящего момента будет равна работе восстанавливающего момента.

Диаграмма статической остойчивости (рис. 6) представляет собой графическую зависимость восстанавливающего момента (ось ординат) от угла крена (ось абсцисс). Точка А диаграммы определяет максимальный восстанавливающий момент ($M_{вос.мах}$) и максимальный угол наклоения ($\Theta_{мах}$) соответствующий ему. Восходящий участок диаграммы от точки О до точки А характеризует устойчивое равновесие машины-амфибии, нисходящий участок от точки А до точки В – неустойчивое равновесие. Точка В пересечения диаграммы с осью углов крена определяет угол заката ($\Theta_{зак}$) диаграммы. При углах наклоения больше угла заката, восстанавливающий момент становится отрицательным и не противодействует внешним моментам крена.

Минимальный опрокидывающий момент ($M_{опр.мин}$) определяется из условия равенства площадей OLK и KAN, отражающих равенство работы кренящего и восстанавливающего моментов. Для этого по диаграмме подбирают ординату OL так, чтобы обеспечивалось равенство площадей OLK и KAN.

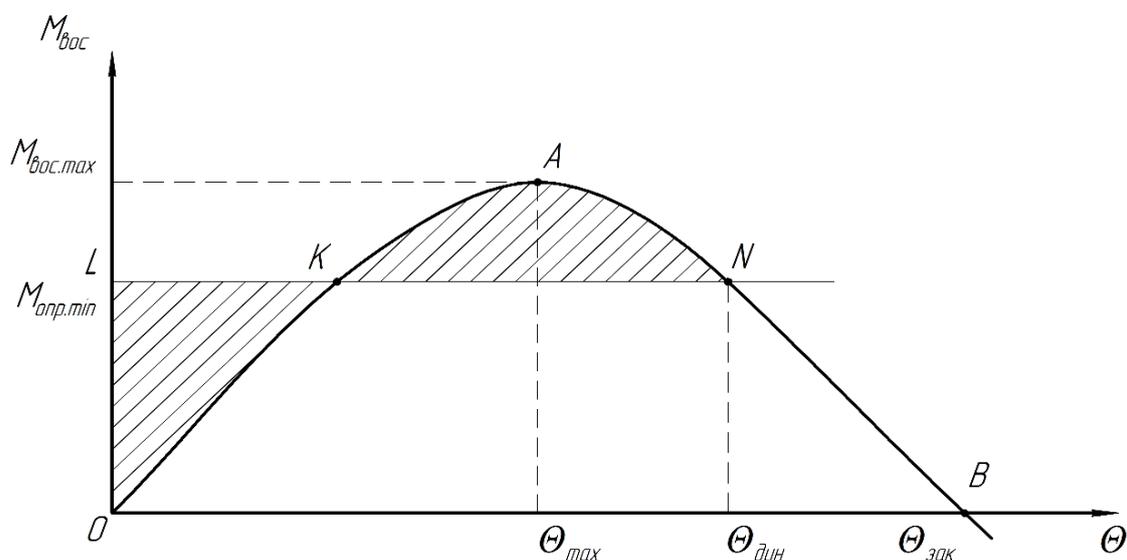


Рис. 6. Диаграмма статической остойчивости машины-амфибии

$M_{опр.мин}$ – минимальный опрокидывающий момент; $M_{вос.мах}$ – максимальный восстанавливающий момент; $\Theta_{мах}$ – максимальный угол наклоения; $\Theta_{дин}$ – динамический угол наклоения; $\Theta_{зак}$ – угол заката

Диаграмма динамической остойчивости (рис. 7) отражает зависимость работы W восстанавливающего момента (или плеча l_d динамической остойчивости) – ось ординат от угла наклоения (Θ) – ось абсцисс. Диаграмма динамической остойчивости является интегральной кривой по отношению к диаграмме статической остойчивости. Ординаты диаграммы динамической остойчивости при всех углах наклоения представляют в соответствующем масштабе площади диаграммы статической остойчивости, ограниченные теми же углами наклоений. Точка перегиба N диаграммы динамической остойчивости соответствует максимуму диаграммы статической остойчивости (точка А). Точка Р – максимум диаграммы динамической остойчивости – соответствует углу заката диаграммы статической остойчивости (точка В) [5].

Диаграмма динамической устойчивости может быть использована для определения динамического угла наклона и величины минимального опрокидывающего момента ($M_{\text{опр.мин}}$).

Для определения минимального опрокидывающего момента ($M_{\text{опр.мин}}$), при воздействии которого машина-амфибия находится на грани опрокидывания, следует провести из начала координат касательную к диаграмме динамической устойчивости до касания её в точке F. Значение ординаты точки касания соответствует значению минимального опрокидывающего момента ($M_{\text{опр.мин}}$), а значение абсциссы соответствует предельному углу динамического крена ($\Theta_{\text{дин.пред}}$) под действием этого момента. Точка P диаграммы динамической устойчивости физического смысла не имеет.

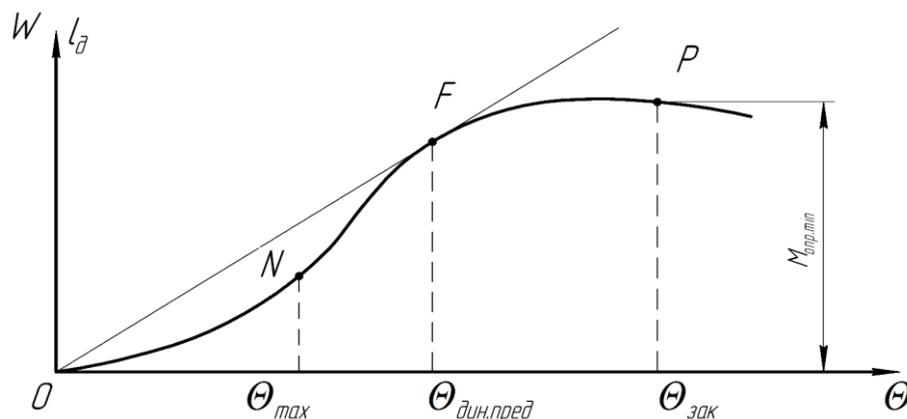


Рис. 7. Диаграмма динамической устойчивости машины-амфибии

Θ_{max} – максимальный угол крена статической устойчивости, $\Theta_{\text{дин.пред}}$ – предельный угол крена динамической устойчивости, $\Theta_{\text{зак}}$ – угол заката диаграммы статической устойчивости; $M_{\text{опр.мин}}$ – минимальный опрокидывающий момент

При увеличении кренящего момента может оказаться, что всей площади диаграммы устойчивости не хватает для уравнивания работы кренящего момента. В этом случае машина перевернется, потому что избыточная работа кренящего момента не может быть погашена работой восстанавливающего момента.

Рассмотрев диаграммы статической (рис. 6) и динамической (рис. 7) устойчивости, можно сделать следующие выводы:

1) машина-амфибия при движении по воде обладает тем большей устойчивостью, чем больше ордината диаграммы статической устойчивости (рис. 6) и чем больше площадь диаграммы, т.е. чем дальше отстоит от начала координат точка L пересечения кривой с осью абсцисс;

2) на величину ординаты диаграммы статической устойчивости (а, следовательно, и на величину начальной метацентрической высоты машины) в основном оказывают влияние ширина машины-амфибии и положение центра тяжести, а также положение центра давления по высоте;

3) величина площади диаграммы в основном зависит от высоты надводного борта: чем выше надводный борт, тем устойчивее машина при больших углах крена Θ .

Список литературы / References

1. Васильев В.Ф. Водометные движители: Учебное пособие. М.: Издательство МАДИ (ГТУ), 2007. С. 24 – 38.
2. Редькин М.Г. Плавающие колесные и гусеничные машины. М.: Воениздат, 1966. С. 13–23.
3. Новак Г.М. Справочник по катерам, лодкам и моторам, Ленинград: «Судостроение», 1982. С. 18–24.
4. Новицкий В. Ф. Устойчивость корабля: Военная энциклопедия в 18 т. М.: Т-во Сытина, 1911-1915. С. 17. С. 201–203.
5. Степанов А.П. Конструирование и расчет плавающих машин, М.: Машиностроение, 1983. С. 33–50.