

УДК 656.62.052
DOI: 10.37890/jwt.vi73.328

Аналитический расчет параметров маневра судна «движение лагом»

П.Н.Токарев

Волжский государственный университет водного транспорта, г. Нижний Новгород, Россия

Аннотация. Судоводитель должен хорошо знать маневренные качества своего судна, а также возможности судовых средств управления для выполнения того или иного маневра. В «Информации» о параметрах маневрирования, которая имеется на судне, нет данных о выполнении такого важного маневра, как «движение лагом», который часто используется при выполнении привально-отвальных маневров на стесненной по габаритам акватории. В работе, приняв некоторые допущения, приведено решение системы уравнений движения судна применительно к рассматриваемому маневру. Автором получены аналитические выражения для расчета скорости и пройденного расстояния судна по времени маневра «разгона», движения по инерции и активного гашения скорости движения. Используя полученные выражения, выполнен расчет параметров «движения лагом» теплохода проекта 507.

Приведены графики зависимости скорости и пройденного расстояния судна от времени маневра.

Ключевые слова: двухвинтовое судно, работа движителей «враздрай», носовое подруливающее устройство, стесненная акватория, «движение лагом», расчет параметров.

Analytical calculation of the vessel maneuver «sideways movement» parameters

Pavel N. Tokarev

Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. A boatmaster must be well aware of the manoeuvrability of his vessel as well as the ability of the ship's controls to perform a manoeuvre. In the "Information" on maneuvering parameters, which is available on the ship, there is no data on the performance of such an important maneuver as "sideways movement," which is often used in the performance of mooring maneuvers in a cramped water area. In the work, having made some assumptions, the solution of the system of equations of movement of the vessel in relation to the considered maneuver is given. The author has obtained analytical expressions for calculating the speed and distance traveled by the vessel according to the time of the "acceleration" maneuver, inertia movement and active suppression of the speed of movement. Using the obtained expressions, the parameters of the "sideways movement" of the motor ship of project 507 were calculated. Graphs of the dependence of the speed and distance traveled by the vessel on the maneuver time are given.

Keywords: twin-screw vessel, the work of the propellers in the opposite directions, bow thruster, cramped water area, "sideways movement", calculation of parameters.

В практике работы судоводителя часто возникает необходимость выполнения маневров, когда скорость хода близка к нулевой. Как правило, это связано с выполнением привально – отвальных маневров в порту, на акваториях ограниченных размеров. В этом случае практический интерес для судоводителей представляет знание возможностей судовых средств управления своего судна для выполнения не

только «разворота на месте», рассмотренным автором ранее [1], но и такого маневра как «движение лагом».

Принимая допущения, что судно не имеет дифферента и крена, и пренебрегая асимметрией судна относительно поперечной вертикальной плоскости, проходящей через начало системы координат, связанной с судном [1], аналитические выражения для определения параметров неустановившегося движения судна «лагом» найдем из решения системы уравнений (35) [2].

Полагаем, что судно не имеет угловой скорости вращения и продольного смещения

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{dv_x}{dt} = v_x = \omega = 0$$

система уравнений движения судна «лагом» с учетом схемы действия усилий на судно (рис.1.) и принятых допущений имеет вид:

$$\left. \begin{aligned} T_{E1} - T_{E2} &= 0; \\ Y_R - Y_\Gamma + F_Y &= m(1 + k_{22}) \frac{dv_y}{dt}; \\ M_P + M_R - M_F &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где T_{E1} и T_{E2} - полезный упор движителей на передний и задний ход соответственно;

Y_Y , Y_R и F_Y - боковая составляющая гидродинамической силы на корпусе, рулевом органе и сила, создаваемая носовым подруливающим устройством судна соответственно;

M_R , M_F и M_P - момент, создаваемый рулевым устройством, подруливающим устройством и работой движителей «враздрай» соответственно;

m - масса судна;

v_y - скорость судна при движении лагом;

k_{22} - коэффициент присоединенной массы судна [3].

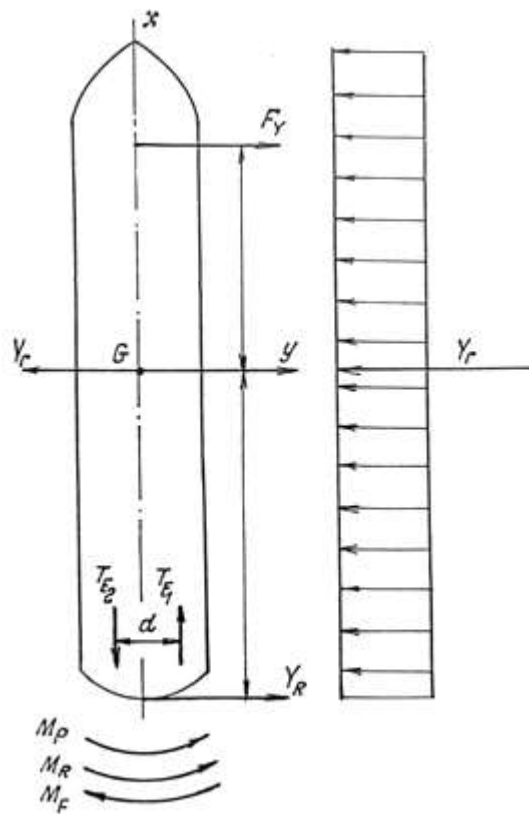


Рис.1. Силы и моменты, действующие на судно при движении лагом ($v_x = \omega = 0$)

Из третьего уравнения системы (1) можно определить условие равенства моментов, действующих на судно с тем, чтобы исключить вращение судна.

Движение судна лагом, как показывает анализ выполненных исследований, может быть обеспечено:

1. Работой подруливающего устройства и работой винтов «враздрай» без перекадки рулевого органа при выполнении условия

$$M_P = M_F. \quad (2)$$

2. Работой движителей «враздрай» независимо от их режима работы и перекадкой насадок «наружу» (при их отдельной перекадке) без использования подруливающего устройства при выполнении условия

$$q_e \operatorname{tg} \alpha_n = \frac{d}{L}. \quad (3)$$

3. Работой движителей «враздрай», подруливающего устройств и перекадкой рулевого органа при выполнении условия

$$q_e \operatorname{tg} \alpha_n = \frac{F_y \bar{l}_{ПВ}}{T_{E1(2)}} \pm \bar{d}, \quad (4)$$

$$\text{где } \bar{l}_{ПВ} = l_{ПВ} / L; \quad \bar{d} = d / L$$

Знак плюс соответствует перекладке насадок «наружу», минус – «внутри».

Для определения угла перекладки насадок α_n может быть использован вспомогательный график рис. 2.

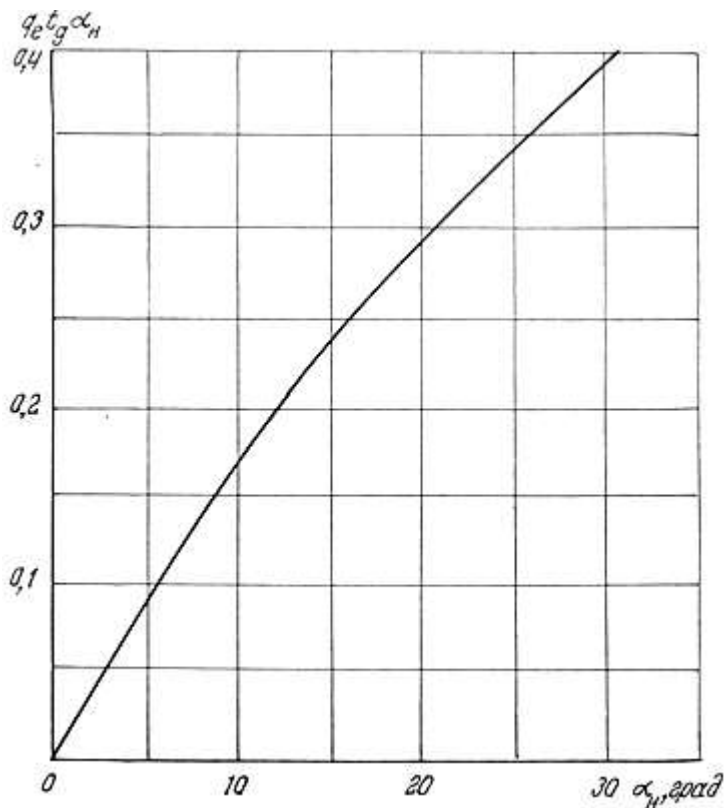


Рис.2. График зависимости величины $q_e \operatorname{tg} \alpha_n$ от угла перекладки насадки

Параметры неустановившегося движения судна лагом для случая «разгона» $v_y = f(t)$, $S = f(t)$ и $v_y = f(s)$ определяются из решения второго уравнения системы (1), которое приводится к виду:

$$\frac{dv_y}{dt} = b - av_y^2. \quad (5)$$

где коэффициенты a и b определяются по следующим выражениям:

$$\left. \begin{aligned} a &= \frac{C_{уп} \rho S_0}{2m(1+k_{22})}; \\ b &= \frac{Y_R + Y_p}{2m(1+k_{22})}. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

где $C_{уп}$ – коэффициент позиционной составляющей нормальной гидродинамической силы (коэффициент сопротивления корпуса судна при движении «лагом»), определяемый по выражению (6) [4].

Уравнение (5) подобно выражению (4) [1] отличие в коэффициентах a и b .

Выражение для определения времени, необходимого до установившейся скорости движения судна «лагом» получено в следующем виде

$$t = \frac{1}{2aE} \ln \left| \frac{E + v}{E - v} \right|, \quad (7)$$

где $E = \sqrt{b/a}$ - скорость движения судна в установившемся режиме.

Зависимость скорости движения от времени маневра имеет вид:

$$v = E \frac{e^{2aEt} - 1}{1 + e^{2aEt}}. \quad (8)$$

Зависимость пройденного расстояния от времени определяется из выражения

$$S = \frac{1}{2a} \left[\ln \frac{(1 + e^{2aEt})^2}{e^{2aEt}} - 1,386 \right]. \quad (9)$$

В некоторых случаях необходимо знать значение пройденного пути от скорости движения v . Для этого запишем следующее соотношение:

$$\frac{dv}{dt} = \frac{dv}{dS} \frac{dS}{dt} = v \frac{dv}{dS}. \quad (10)$$

тогда

$$S = \int_0^v \frac{v dv}{b - av^2}. \quad (11)$$

После интегрирования выражения (11) и некоторых преобразований, получим

$$S = \frac{1}{2a} \ln \left| \frac{E^2}{E^2 - v^2} \right|, \quad (12)$$

или

$$v = E \sqrt{1 - \frac{1}{e^{2aS}}}. \quad (13)$$

Для определения параметров разгона до установившегося значения используем выражение (5), принимая $dv/dt = 0$, тогда

$$b - av_0^2 = 0 \quad (14)$$

тогда

$$v_0 = \sqrt{\frac{b}{a}} = E \quad (15)$$

Подставляя выражение (15) в формулу (8), находим, что

$$\frac{e^{2aEt} - 1}{1 + e^{2aEt}} = 1. \quad (16)$$

Соотношение (16) равно единице при $t \rightarrow \infty$. Для практических расчетов обычно принимают:

$$v_0 = 0,95E. \quad (17)$$

Подставляя выражение (17) в формулу (8), имеем:

$$t_{разг} = \frac{1,83}{aE}. \quad (18)$$

Путь, который пройдет судно до установившегося значения скорости, определяем из выражения (9) с учетом (18)

$$S = \frac{1,165}{a}. \quad (19)$$

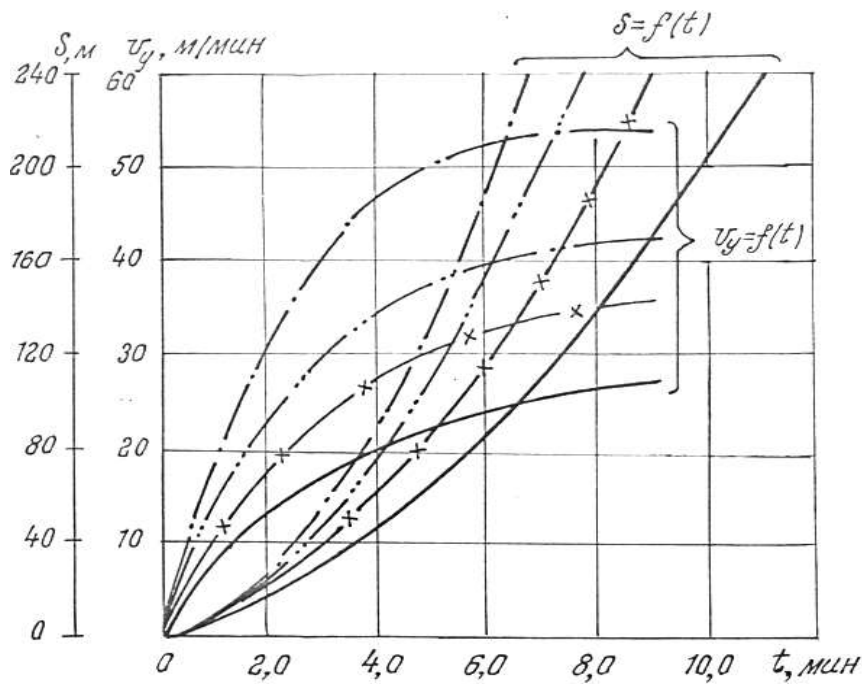


Рис.3. Зависимости скорости V_y и пути перемещения судна S от времени при

- неустановившемся движении лагом (разгон)
- · — · — в балласте, перекладка насадок «наружу»;
- · — · — в балласте, перекладка насадок «внутри»;
- × — × — в грузу, перекладка насадок «наружу»;
- в грузу, перекладка насадок «внутри».

Зависимости $v = f(t)$, $S = f(t)$ и $S = f(v)$ для определения параметров движения по инерции получены в следующем виде:

$$v = \frac{v_1}{1 + av_1 t}$$

$$S = \frac{1}{a} \ln|1 + av_1 t|$$

$$S = \frac{1}{a} \ln \left| \frac{v_1}{v} \right|$$

В выражениях (20) - (22) v_1 – скорость движения в момент остановки работы подруливающего устройства и движителей.

Результаты расчетов пройденного расстояния и скорости по времени маневра при движении по инерции $v_1 = v_0$ приведены на рис.4.

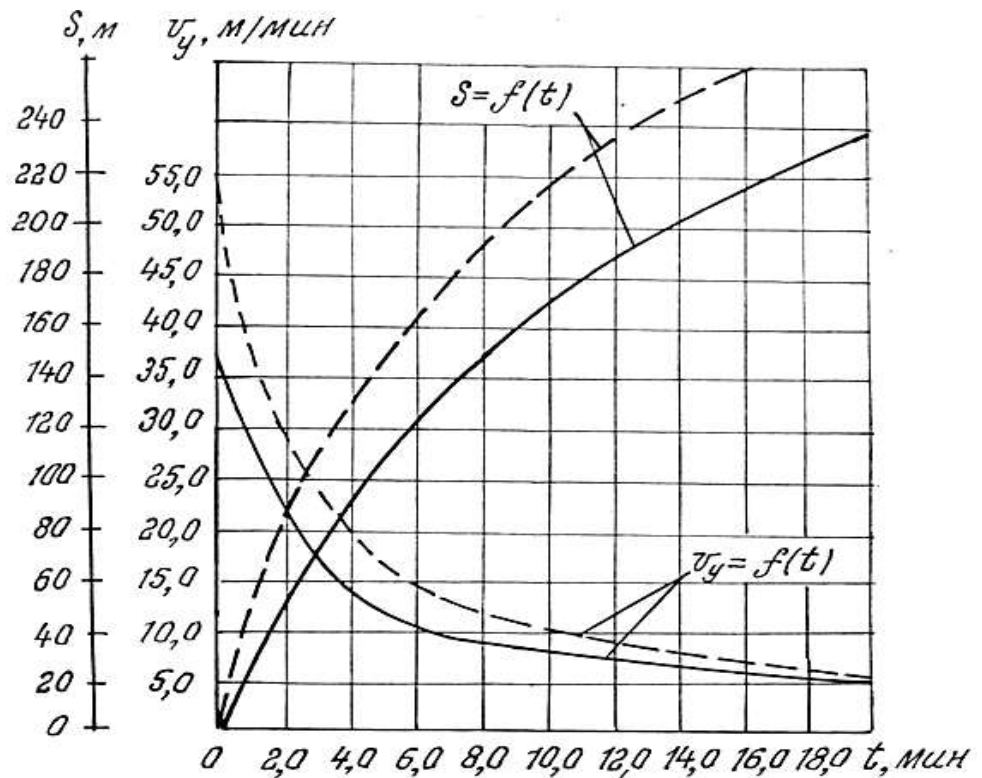


Рис.4. Зависимости скорости v_y и пути S от времени при движении по инерции

— в грузу;
 - - - в балласте

При активном гашении инерции движения судна уравнение (5) принимает следующий вид:

$$\frac{dv}{dt} = -b - av^2. \quad (23)$$

Время гашения инерции движения определяется по выражению:

$$t = \frac{1}{\sqrt{ab}} \left(\operatorname{arctg} \frac{v_2}{\sqrt{b/a}} - \operatorname{arctg} \frac{v}{\sqrt{b/a}} \right), \quad (24)$$

Скорость движения по времени маневра найдем из следующего выражения

$$v = \sqrt{\frac{b}{a}} \operatorname{tg} \left(\operatorname{arctg} \frac{v_2}{\sqrt{b/a}} - \sqrt{abt} \right). \quad (25)$$

Зависимость пройденного пути по времени определяется по выражению:

$$S = \frac{1}{a} \ln \frac{\cos \left(\operatorname{arctg} \frac{v_2}{\sqrt{b/a}} - \sqrt{abt} \right)}{\cos \left(\operatorname{arctg} \frac{v_2}{\sqrt{b/a}} \right)}. \quad (26)$$

В выражениях (24) - (26) v_2 - скорость движения судна на момент начала активного гашения инерции.

Выражение по определению пройденного расстояния от скорости движения получено в следующем виде

$$S = \frac{1}{2a} \ln \left| 1 + \left(\frac{v_2}{\sqrt{b/a}} \right)^2 \right|. \quad (27)$$

Время необходимое для активного гашения инерции движения до $v=0$ найдем из выражения:

$$t = \frac{1}{\sqrt{ab}} \operatorname{arctg} \frac{v_2}{\sqrt{b/a}}. \quad (28)$$

Результаты расчетов пути и скорости от времени маневра для теплохода пр.507 в полном грузу и в балласте с установившейся скорости движения v_0 при таком же режиме работы движителей, что и для случая разгона представлены на рис.5.

Влияние мелководья на параметры движения может быть учтено через коэффициенты k_{22} и $C_{уп}$.

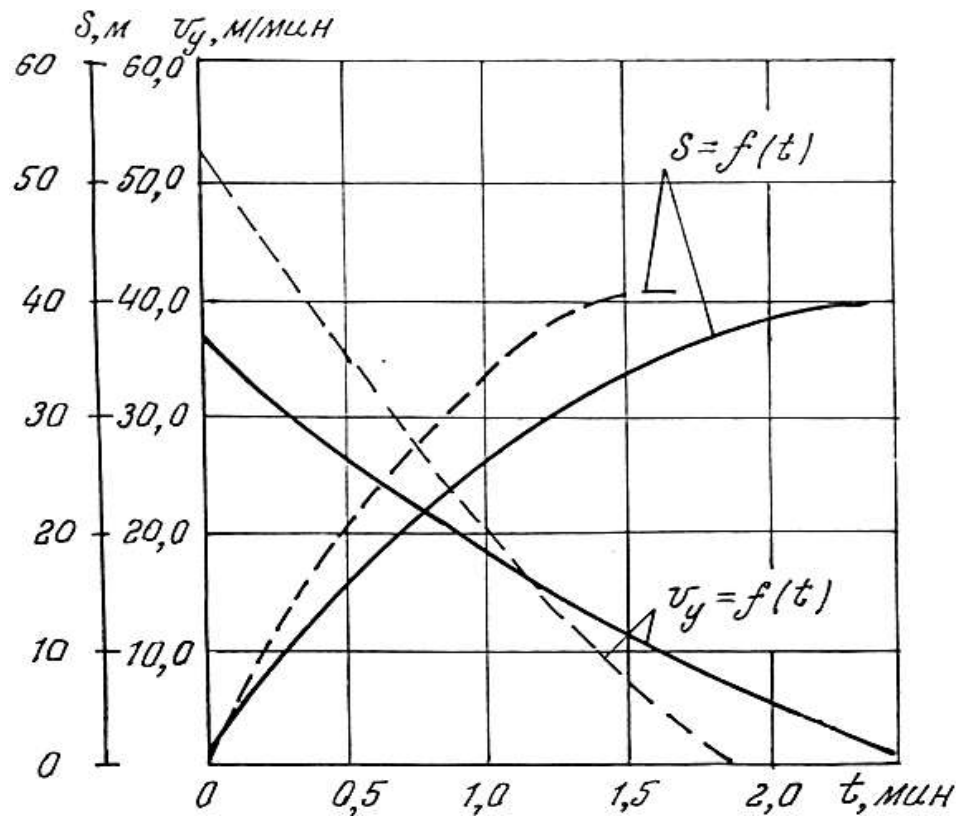


Рис. 5. Зависимости скорости V_y и пути S от времени при активном торможении
 — в грузу;
 - - - в балласте.

Таким образом, выражения, приведенные в статье, могут быть использованы для выполнения расчетов параметров движения судна «лагом». Информация о скорости движения «лагом» и пройденного расстояния судном по времени маневра будет полезна судоводителям.

Список литературы

1. Токарев П.Н. Аналитический расчет параметров маневра судна «разворот на месте» / П.Н.Токарев // Н.Новгород. «Научные проблемы водного транспорта». – 2020. – №64. – С. 207–214.
2. Токарев П.Н. Математическая модель произвольного движения и маневрирования судна/П.Н.Токарев // Н.Новгород. Вестник ВГАВТ. – 2017. – №56. – С. 198–214.
3. Павленко, В.Г. Ходкость и управляемость судов/ В.Б.Бавин, В.И. Зайков, В.Г. Павленко, Л.Б.Сандлер. – Москва: Транспорт, 1991. – 397 с.
4. Токарев П.Н. Метод определения гидродинамических усилий на корпусе судна при произвольном плоском движении/П.Н.Токарев // Н.Новгород. Вестник ВГАВТ. – 2017. – №52. – С.191–204.
5. Войткунский Я.И. Справочник по теории корабля/ Я.И.Войткунский, Р.Я.Першиц, И.А.Титов – Ленинград: Судостроение, 1973. – 512с.

References

1. Tokarev P.N. Analiticheskij raschet parametrov manevra sudna «razvorot na meste» /P.N.Tokarev // N.Novgorod. «Nauchnye problemy vodnogo transporta». – 2020. – №64. – S. 207–214.
2. Tokarev P.N. Matematicheskaya model proizvol'nogo dvizheniya i manevrirovaniya sudna/P.N.Tokarev // N.Novgorod. Vestnik VGAVT. – 2017. – №56. – S. 198–214.
3. Pavlenko V.G. Hodkost i upravlyaemost sudov/ V.B.Bavin_ V.I. Zaikov_ V.G. Pavlenko_ L.B.Sandler. – Moskva_ Transport_ 1991. – 397 s. 1
4. Tokarev P.N. Metod opredeleniya gidrodinamicheskikh usilij na korpuse sudna pri proizvol'nom ploskom dvizhenii/P.N.Tokarev // N.Novgorod. Vestnik VGAVT. – 2017. – №52. – S.191–204.
5. Vojtkunskij YA.I. Spravochnik po teorii korablya/ YA.I.Vojtkunskij, R.YA.Pershic, I.A.Titov – Leningrad: Sudostroenie, 1973. – 512s.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ / INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Токарев Павел Николаевич, к.т.н., доцент, доцент кафедры судовождения и безопасности судоходства. Волжский государственный университет водного транспорта» (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: sudovod@vgavt-nn.ru

Pavel N. Tokarev, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor of the Department of Ship Handling and Safety of Navigation. Volga State University of Water Transport, 603950, Nizhniy Novgorod, Nesterova, 5, e-mail: sudovod@vgavt-nn.ru

Статья поступила в редакцию 19.05.2022; опубликована онлайн 20.12.2022.
Received 19.05.2022; published online 20.12.2022.