

УДК 69.034.4;626.4;51-75

**МОДЕЛИРОВАНИЕ КОЛЕБАНИЙ СУДНА
В НИЖНЕМ ПОДХОДНОМ КАНАЛЕ СУДОХОДНОГО ШЛЮЗА
ПОД ДЕЙСТВИЕМ ПРОДОЛЬНОЙ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ СИЛЫ**

Бойков Иван Михайлович

аспирант

Государственный университет морского и речного флота
им. адмирала С.О. Макарова, Санкт-Петербург

author@apriori-journal.ru

Аннотация. Для нескольких точек подходного канала судходного шлюза в рамках динамической модели численно рассчитаны перемещение и скорость судна при колебаниях в подходном канале под действием продольной гидродинамической силы, возникающей при опорожнении камеры шлюза. Согласно результатам численных расчетов, для выбранных точек подходного канала во все моменты времени перемещение судна при выбранных значениях параметров модели не превышает 1 м, а скорость не превышает 25 см/с.

Ключевые слова: нижний бьеф; шлюз; подходной канал; продольная гидродинамическая сила; динамическая система; колебания.

MODELLING VESSEL OSCILLATIONS IN LOWER APPROACH CHANNEL OF THE LOCK UNDER ACTION OF LONGITUDINAL HYDRODYNAMIC FORCE

Boikov Ivan Mikhailovich

post-graduate student
Admiral Makarov state university of maritime and inland shipping
Saint-Petersburg

Abstract. In the framework of a dynamic model the shift and the velocity of the vessel in the approach channel of the lock during oscillations caused by longitudinal hydrodynamic force induced by emptying of the lock chamber are computed for several points of the approach channel. According to simulation results, for the selected points of the approach channel the shift of the vessel will not exceed 1 m, and its velocity will not exceed 25 cm/s in all points of time for adopted values of model parameters.

Key words: bottom bief; lock; approach channel; longitudinal hydrodynamic force; dynamic system; oscillations.

1. Введение

Волновые процессы, развивающиеся в нижнем подходном канале при опорожнении камеры судоходного шлюза, являются причиной возникновения продольной гидродинамической силы, действующей на судно в подходном канале. В работе [1] предложена методика численного расчета данной силы, основанная на решении одномерного волнового

уравнения. Расчет данной силы важен потому, что его результаты можно сравнить с допускаемой продольной силой, действующей на судно и регламентированной СНиП 2.06.07-87 [3]. Подобное сравнение и было выполнено в [1]. Однако, поскольку действующая на судно сила при наличии удерживающих его упругих связей является причиной изменения его скорости и, как следствие, его вынужденных колебаний, то представляет интерес также и моделирование колебаний судна под действием силы. Настоящая работа посвящена исследованию данного вопроса.

2. Расчет перемещения судна под действием продольной силы

Для расчета изменения скорости судна в подходном канале под действием продольной силы, а также перемещения судна, применим динамическую модель, аналогичную уравнению, приведенному в [2, с. 117].

Обозначим через $z(t)$ перемещение судна в подходном канале. Тогда соответствующая динамическая модель имеет вид:

$$M\ddot{z} + cz = \frac{\omega_1}{\omega_1 - \otimes} \frac{W}{g} \frac{\partial u_1}{\partial t} + \operatorname{sgn}\left(\frac{n}{n-1}u_1 - \dot{z}\right) \cdot \alpha k \otimes \left(\frac{n}{n-1}u_1 - \dot{z}\right)^2 \quad (1)$$

Здесь M – масса судна; c – коэффициент жесткости связи. Обозначения переменных в правой части уравнения (1) – те же, что и в работе [1]: ω_1 – площадь живого сечения подходного канала; W – весовое водоизмещение расчетного судна; \otimes – площадь погруженной части поперечного сечения судна по миделю; g – ускорение свободного падения; $n = \frac{\omega_1}{\otimes}$ – коэффициент стеснения судном живого сечения подходного канала; α – коэффициент кинетической энергии потока; k – эмпирический коэффициент, зависящий от рода поверхности судна. Фигурирующая в правой части (1) скорость $u_1(x, t)$ – это средняя по сечению горизонталь-

ная скорость в подходном канале, зависящая, вообще говоря, от точки канала x и от момента времени t .

Отметим, что в правой части (1) квадратичная по скорости сила несколько модифицирована по сравнению с результатами цитированной статьи, т.к., во-первых, для рассматриваемой динамической задачи важна относительная скорость потока и судна, а, во-вторых, в зависимости от знака данной относительной скорости знак проекции квадратичной силы также будет различным. Последний эффект учтем введением во второе слагаемое в правой части (1) разрывной функции sgn , зависящей от знака своего аргумента следующим образом:

$$sgn y = \begin{cases} 1, & y > 0, \\ 0, & y = 0, \\ -1, & y < 0. \end{cases} \quad (2)$$

Численные расчеты выполнялись в программном пакете Vensim[®] DSS, специально разработанном для вычислительных экспериментов с нелинейными динамическими системами. Для соответствующих вычислительных экспериментов необходимо переписать дифференциальное уравнение второго порядка (1) в форме системы двух дифференциальных уравнений первого порядка. Для этого вводим скорость судна $v = \dot{z}$ и приходим к системе:

$$\begin{cases} \dot{z} = v, \\ \dot{v} = -\frac{c}{M}z + \frac{\omega_1}{\omega_1 - \otimes Mg} \frac{W}{\partial t} \frac{\partial u_1}{\partial t} + sgn\left(\frac{n}{n-1}u_1 - v\right) \cdot \frac{\alpha\kappa \otimes}{M} \left(\frac{n}{n-1}u_1 - v\right)^2 \end{cases} \quad (3)$$

Параметры, фигурирующие в правых частях (1) и (3), для численных расчетов взяты те же, что и в цитированной работе автора. Масса судна $M = 1300$ т, жесткость связи принята равной $c = 100$ кгс/см = 100000 Н/м [2]. В качестве начальных условий принято:

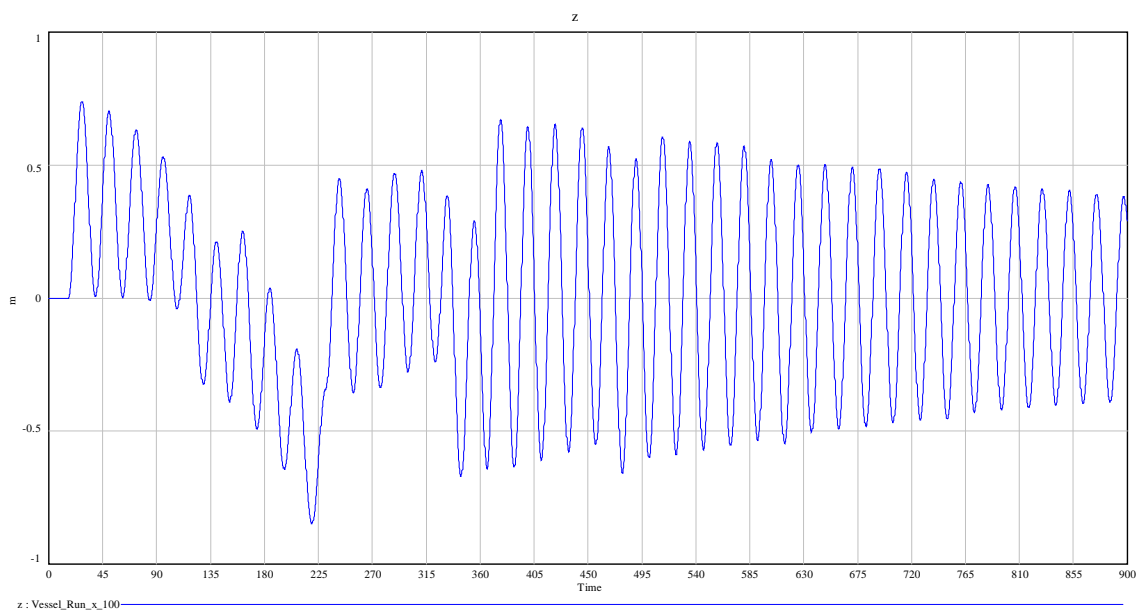
$$z_0 = 0, \quad v_0 = 0. \quad (4)$$

Численные расчеты выполнены в точках подходного канала $x = 100, 200, 300, 400$ м, при этом в правую часть второго из уравнений системы (3) подставлялись зависимости от времени скорости u_1 и ее производной $\partial u_1 / \partial t$, найденные численно для данных точек подходного канала в работе [1] (и изображенные на рис. 2 и 3 цитированной работы). При этом делалось упрощающее предположение, согласно которому можно принять $u_1(z, t) \approx u_1(0, t)$, и аналогично для $\partial u_1 / \partial t$, – иными словами, значения скорости течения и ее производной по времени при колебаниях можно брать в точке начального равновесия, а не в фактической точке нахождения судна (по результатам численных расчетов, данное допущение обосновывается тем, что рассчитанные колебания характеризуются малой амплитудой).

Результаты расчета перемещения и скорости судна для четырех точек подходного канала показаны ниже на рис. 1а-4а и 1б-4б.

Для всех четырех указанных точек и во все моменты времени перемещение судна при выбранных значениях параметров системы не превышает 1 м, а скорость не превышает 25 см/с.

а)



б)

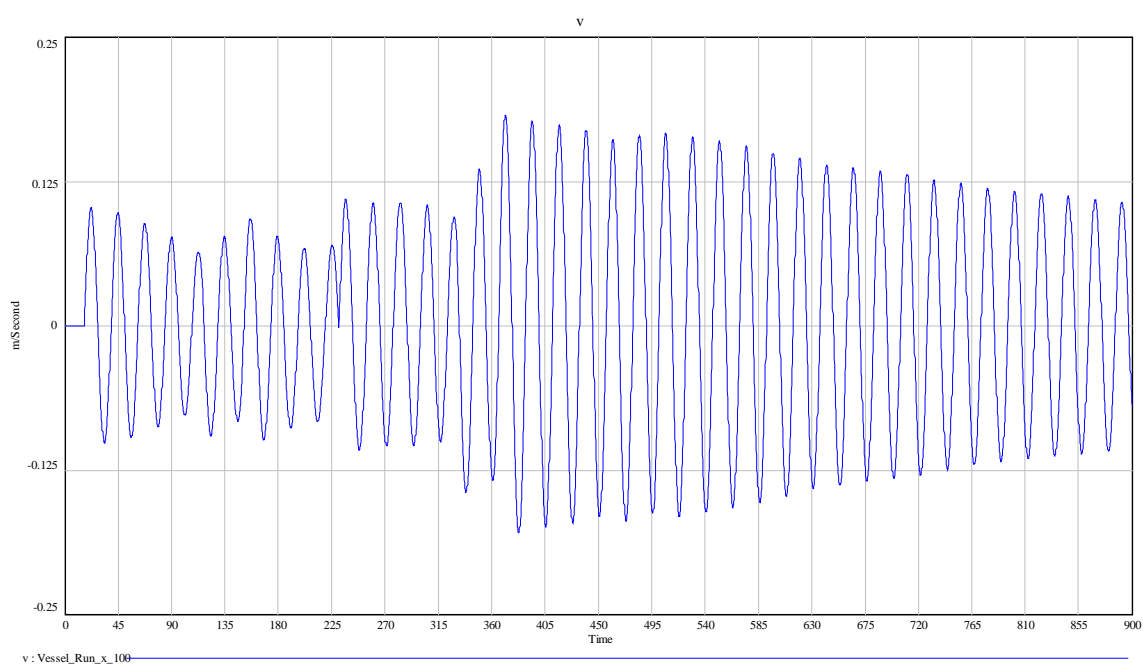
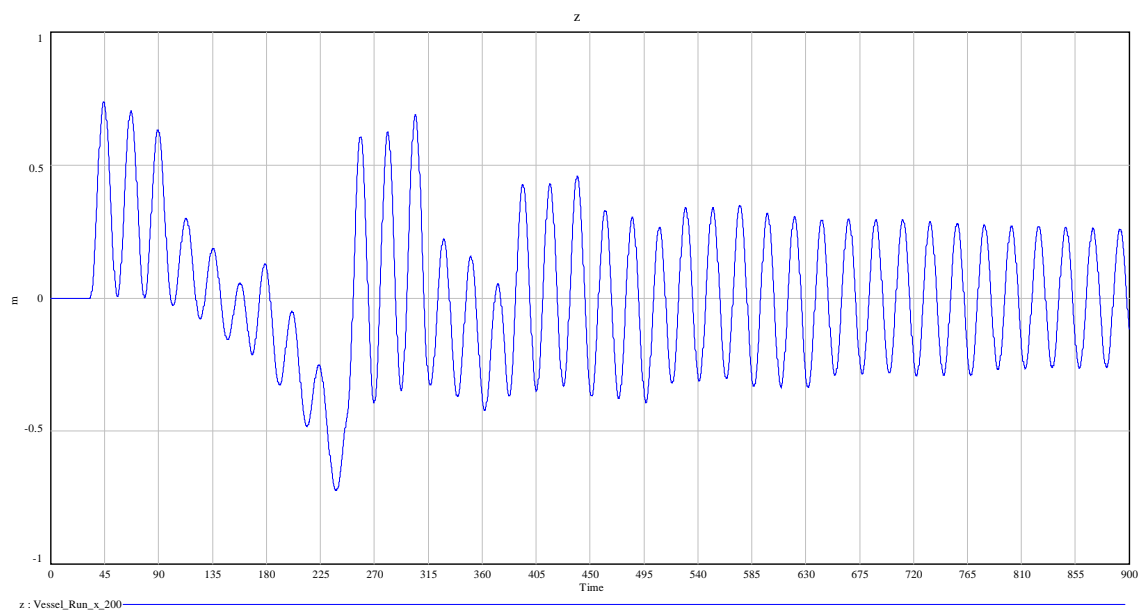


Рис. 1. а) Перемещение (м) и б) скорость (м/с) судна, покоившегося в начальный момент времени в точке $x = 100$ м подходного канала

а)



б)

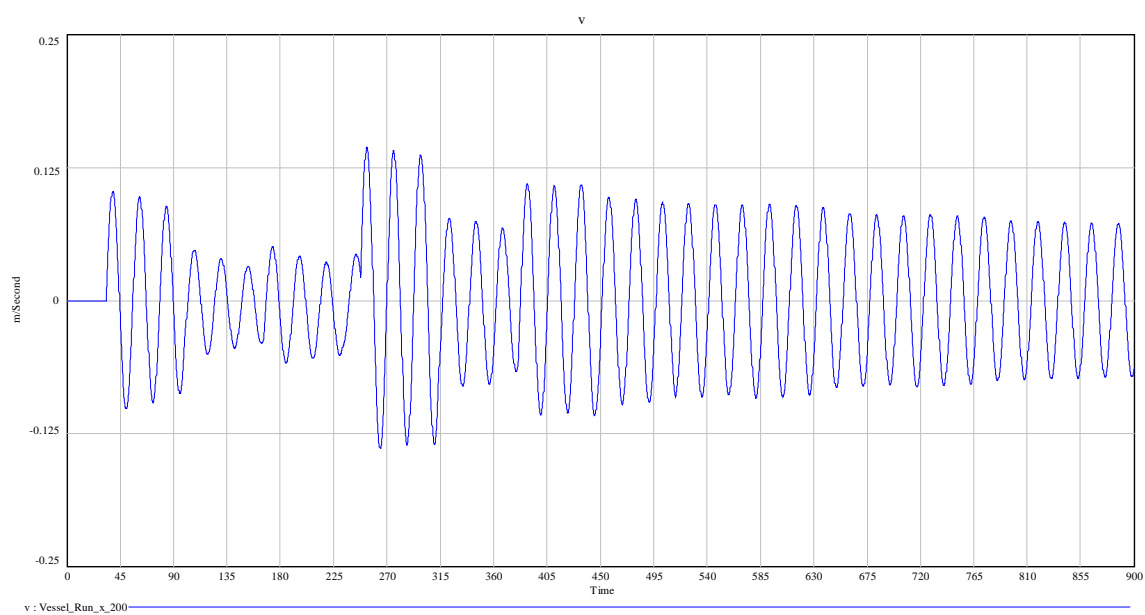
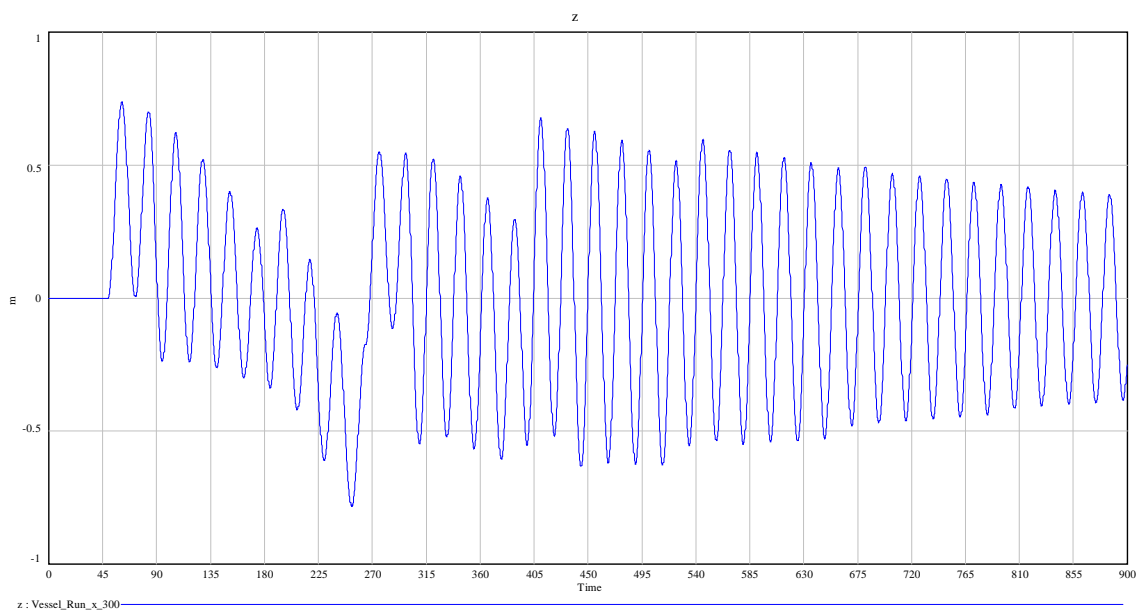


Рис. 2. а) Перемещение (м) и б) скорость (м/с) судна, покоившегося в начальный момент времени в точке $x = 200$ м подходного канала

а)



б)

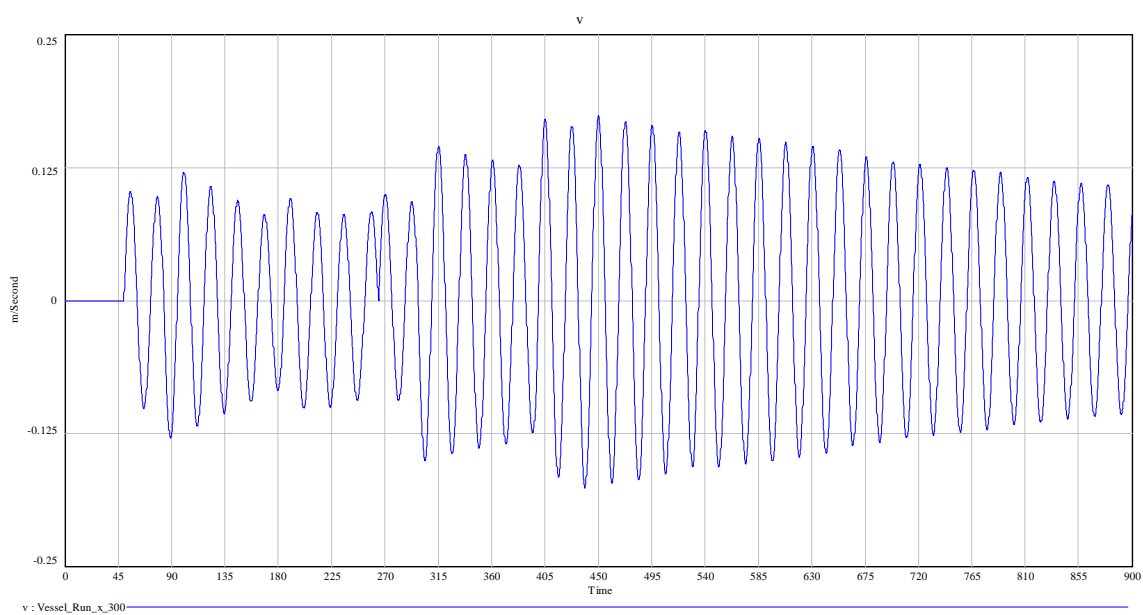
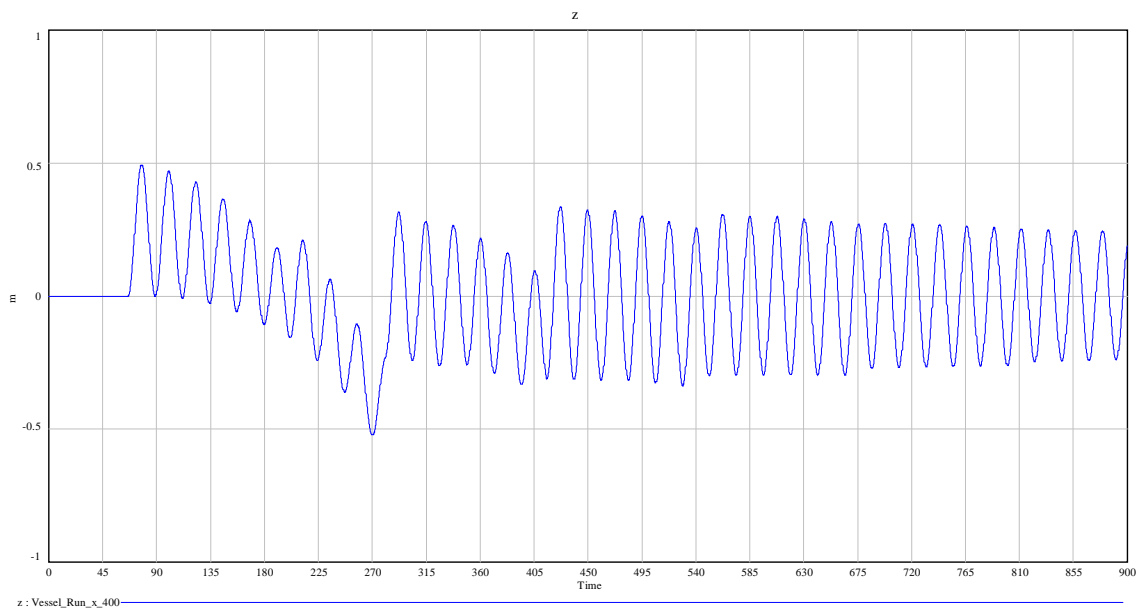


Рис. 3. а) Перемещение (м) и б) скорость (м/с) судна, покоившегося в начальный момент времени в точке $x = 300$ м подходного канала

а)



б)

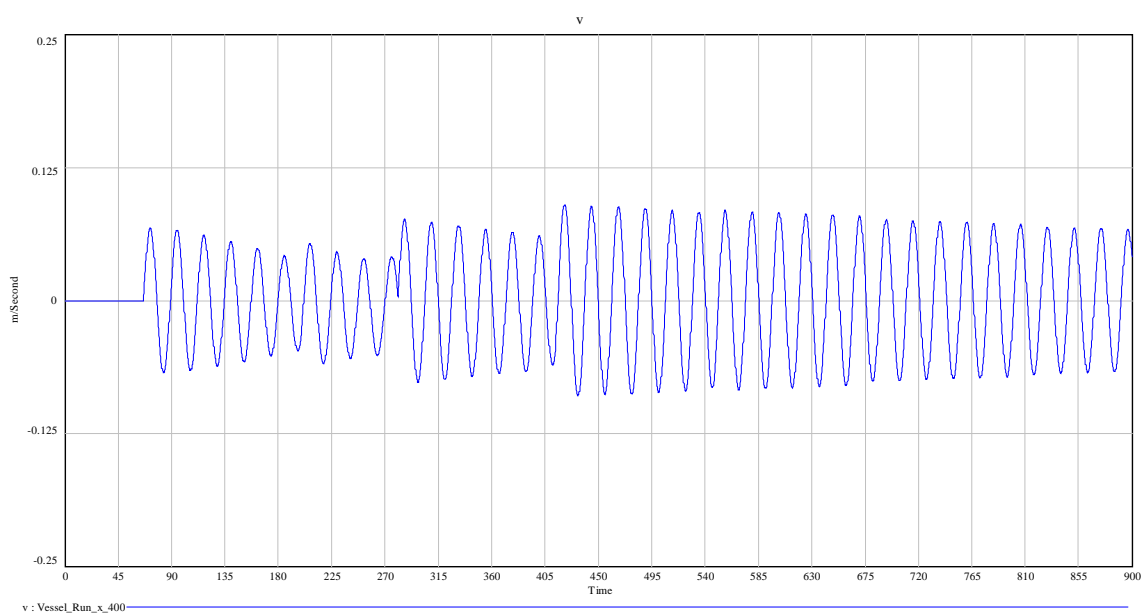


Рис. 4. а) Перемещение (м) и б) скорость (м/с) судна, покоившегося в начальный момент времени в точке $x = 400$ м подходного канала

3. Выводы

Колебания судна в подходном канале под воздействием продольной гидродинамической силы, возникающей при опорожнении камеры судоходного шлюза, можно математически описать нелинейной динамической системой. При этом, в силу нелинейности системы, уравнения движения не могут быть проинтегрированы в замкнутой форме. Поэтому задача может быть исследована лишь путем вычислительного эксперимента, который удобно осуществлять в одном из специализированных программных пакетов для моделирования динамических систем (например, пакета Vensim[®] DSS). Результаты моделирования, описанные в настоящей работе, могут быть полезны при оценке условий стоянки судов, ожидающих шлюзования у причальной стенки нижнего подходного канала судоходного шлюза.

Список использованных источников

1. Бойков И.М. Расчет продольной гидродинамической силы, действующей на судно в нижнем подходном канале при опорожнении камеры шлюза // APRIORI. Серия: Естественные и технические науки [Электронный ресурс]. 2014. № 4. Режим доступа: <http://apriori-journal.ru/seria2/4-2014/Vojkov.pdf>
2. Семанов Н.А., Варламов Н.Н., Баланин В.В. Судоходные каналы, шлюзы и судоподъемники. М.: Транспорт, 1970. 352 с.
3. СНиП 2.06.07-87 «Подпорные стены, судоходные шлюзы, рыбопропускные и рыбозащитные сооружения». М.: Госстройком СССР, 1987. 34 с.