

УДК 630*378.5.001.57

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПЛАВАЮЩЕГО ПУЧКА БРЕВЕН С РЕЙДОВЫМИ МЕХАНИЗМАМИ

Г. Я. СУРОВ

Архангельский лесотехнический институт

Важное направление развития водного транспорта леса — комплексная механизация рейдовых сортировочно-формировочных работ. Эти работы производят с помощью специализированных механизмов, рабочие органы которых выполнены в виде упругих элементов (запорные стойки, захваты, толкатели). Примером такого механизма может служить устройство для остановки плывущих пучков бревен [2]. Оно устанавливается на мосту, перекинутом через подводный коридор, и представляет собой шарнирно закрепленную запорную стойку, снабженную съемным демпфером и механизмом запора.

При создании новых специализированных машин необходимо исследовать динамическое взаимодействие их с плавающим пучком бревен. Натурные исследования происходящих при этом процессов сложны и громоздки. Кроме того, для регистрации скоротечных по времени процессов, происходящих при динамическом взаимодействии пучка с механизмом, требуется тензометрическое оборудование, которое обычно неустойчиво работает в полевых условиях. Поэтому наиболее целесообразно проводить исследования на моделях и полученные результаты проверять в натуральных условиях.

При моделировании динамического взаимодействия плавающего пучка бревен с механизмом следует учитывать, что пучок взаимодействует и с окружающей его жидкостью. Для обеспечения подобия обтекания пучка вязкой несжимаемой жидкостью в натуральных и модельных условиях необходимо одновременно соблюдать соответственно критерии Фруда, Рейнольдса, Струхала, Эйлера и Вебера [8]:

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{gt}}; \quad (1)$$

$$Re = \frac{vt}{\nu}; \quad (2)$$

$$Sh = \frac{l}{vt}; \quad (3)$$

$$Eu = \frac{2P}{\rho_{ж} v^2}; \quad (4)$$

$$We = \frac{\sigma}{v^2 \rho_{ж} l}; \quad (5)$$

где v , l , t — соответственно скорость движения, линейный размер и промежуток времени;

g — ускорение свободного падения;

$\rho_{ж}$, ν , σ , P — соответственно плотность, кинематический коэффициент вязкости, коэффициент поверхностного натяжения и давление в жидкости.

Равенство чисел Эйлера для модели и природы выполняется при соблюдении подобия по другим критериям [8]. Кроме того, установлено [8], что при моделировании движения тела по свободной поверхности жидкости подобие по критериям Рейнольдса и Вебера практически невыполнимо. Несоблюдение этих критериев вызывает появление так называемого масштабного эффекта, т. е. несоответствия гидродинамических характеристик модели и природы. Исследования неустановившегося движения плотов [3] показали, что при масштабах моделирования, больших $1/50$ силы поверхностного натяжения, которые характеризуются критерием Вебера, можно не учитывать. Для чисел Рейнольдса характерно явление автомодельности, которое выражается в постоянстве коэффициента гидродинамической силы или какой-либо ее составляющей в определенной их области [8]. Поэтому при исследовании неустановившегося движения плохообтекаемых тел по свободной поверхности жидкости моделируют преобладающие массовые силы, которые учитывает критерий Фруда. Установлено [8], что моделирование по критерию Фруда неустановившегося движения тела по свободной поверхности с соблюдением критерия Струхала технически выполнимо.

При динамическом взаимодействии с механизмом пучок совершает колебательное движение на свободной поверхности жидкости, поэтому для получения достоверных результатов моделирование гидродинамических сил возможно по критерию Фруда с соблюдением критерия Струхала в автомодельной области чисел Рейнольдса.

При взаимодействии возможны местные деформации пучка на площадках контакта с механизмом. Возникающие при этом силы упругости древесины следует моделировать по критерию Коши [5]

$$Ca = \frac{v}{\sqrt{\frac{\epsilon E}{\rho}}}, \quad (6)$$

где ϵ — относительная деформация;
 E — модуль упругости материала;
 ρ — плотность материала.

При одинаковом материале природы и модели ($E_n = E_m$; $\rho_n = \rho_m$) и при геометрическом подобии площадок контакта ($\epsilon_n = \epsilon_m$) из условия равенства критерия Коши для природы и модели следует

$$v_n = v_m. \quad (7)$$

Индекс «н» указывает на принадлежность величин к натурному объекту, индекс «м» — к модели.

В то же время из условия моделирования по критерию Фруда

$$v_m = v_n \sqrt{a_l}, \quad (8)$$

где a_l — линейный масштаб моделирования, который равен отношению линейного размера модели к соответствующему размеру природы.

Из выражений (7) и (8) следует, что критерии Коши и Фруда несовместимы при рассмотренных выше условиях.

Выясним техническую выполнимость одновременного соблюдения критериев Фруда и Коши. Для этого при условии сохранения подобия по Фроду масс модели и природы ($\rho_m = \rho_n$) и при геометрическом подобии площадок контакта ($\epsilon_m = \epsilon_n$), используя выражение (8), из условия $Ca_m = Ca_n$ получили:

$$E_m = E_n a_l. \quad (9)$$

Из данного выражения следует, что одновременное соблюдение критериев Фруда и Коши при геометрическом подобии площадок контакта модели и натуры возможно при масштабном изменении модуля упругости материала модели.

Одновременное соблюдение критериев Фруда и Коши возможно также при искаженном моделировании, при котором одноименные величины модели и натуры моделируются в разных масштабах. Выясним условие такого моделирования.

Согласно [1], сила упругости:

$$F = \varepsilon ES, \quad (10)$$

где S — характерная площадь, т. е. площадь контакта пучка бревен с механизмом при их взаимодействии.

При геометрическом подобии и одинаковом материале модели и натуры

$$\frac{F_M}{F_N} = \frac{\varepsilon_M E_M S_M}{\varepsilon_N E_N S_N} = \frac{l_M^2}{l_N^2} \text{ или } \frac{F_M}{F_N} = a_l^2. \quad (11)$$

В то же время сила упругости [1]

$$F = \rho S v^2. \quad (12)$$

При моделировании по Фруду с соблюдением критерия Коши необходимо одновременное выполнение условий (8) и (11). Тогда

$$\frac{F_M}{F_N} = \frac{\rho_M S_M v_M^2}{\rho_N S_N v_N^2} = a_l^2 \text{ или } \frac{S_M (v_N \sqrt{a_l})^2}{S_N v_N^2} = a_l^2,$$

откуда

$$\frac{S_M}{S_N} = a_l. \quad (13)$$

Из данного выражения следует, что одновременное соблюдение критериев Фруда и Коши возможно при отношении площадей контакта бревенного пучка с рейдовым механизмом для модели и натуры, равном линейному масштабу моделирования.

При динамическом взаимодействии пучка бревен с рейдовым механизмом, кроме того, возникают общие деформации пучка, которые заключаются в некотором смещении бревен относительно друг друга. Эти деформации пучка смоделировать довольно сложно [4]. Поэтому влияние общих деформаций пучка на процесс взаимодействия его с механизмом следует исследовать в натуральных условиях. Гидродинамическое влияние жидкости и влияние местных деформаций пучка следует изучать для «жестких» пучков из модельных бревен, т. е. пучков, у которых при возникающих во время взаимодействия нагрузках бревна не смещаются относительно друг друга. Для обоснования метода моделирования необходимо, прежде всего, оценить местные деформации модели пучка бревен и возникающие при этом силы упругости древесины. Местными деформациями рабочих органов механизма можно пренебречь, так как модуль упругости древесины значительно меньше модуля упругости металлов, из которых изготавливают рабочие органы механизма.

В общем случае перемещение центра масс модели ударяющего тела x равно сумме его местной деформации x_m и деформации упругой системы x_0 , моделирующей механизм:

$$x = x_m + x_0. \quad (14)$$

Иначе данное выражение можно записать

$$\frac{F}{c} = \frac{F}{c_m} + \frac{F}{c_0}, \quad (15)$$

где F — сила взаимодействия;
 c, c_m, c_0 — коэффициент жесткости соответственно результирующей, модели и упругой системы.

Тогда

$$c = \frac{c_m c_0}{c_m + c_0}. \quad (16)$$

Для определения коэффициента жесткости модели рассмотрим взаимодействие цилиндрической поверхности с плоскостью. При этом полуширина площадки контакта [7]

$$a = 1,52 \sqrt{\frac{Fr}{lE}}, \quad (17)$$

где r — радиус кривизны цилиндрической поверхности;
 l — длина контактной поверхности;
 E — модуль упругости древесины.

При известной величине a деформация модели

$$x_m = r - \sqrt{r^2 - a^2}. \quad (18)$$

Тогда коэффициент жесткости

$$c_m = \frac{F}{r - \sqrt{r^2 - \frac{1,52^2 Fr}{lE}}}. \quad (19)$$

Расчеты для условий взаимодействия плавающего пучка бревен с устройством для его остановки [2] показали, что коэффициент жесткости модели масштаба 1/20 равен $(5,18—5,20) \cdot 10^6$ Н/м, в то время как коэффициент жесткости рабочих органов данного механизма того же масштаба на 3—4 порядка меньше [6]. Различие между c_m и c_0 существенно и для других предложенных нами рейдовых сортировочно-формировочных механизмов. Приведенное значение c_m получено при минимальной длине контактной поверхности, равной ширине рабочих органов ($l = 0,01$ м), а из выражения (19) следует, что с увеличением l коэффициент c_m возрастает. Увеличение же коэффициента жесткости рабочих органов с учетом их упругого закрепления на предложенных механизмах в большинстве случаев нецелесообразно, так как при этом возрастают динамические нагрузки на механизм.

Из выражения (16) следует, что при динамическом взаимодействии плавающего пучка бревен с предложенным механизмом [2] результирующая жесткость практически равна жесткости упругой системы. Следовательно, местные деформации древесины незначительны и практически не влияют на процесс взаимодействия. При этом наблюдается эффект вырождения критерия Коши.

Таким образом, при моделировании динамического взаимодействия плавающего тела с рейдовым механизмом, жесткость рабочих органов которого значительно меньше жесткости тела, необходимо учитывать следующее.

Моделирование необходимо осуществлять на «жестких» моделях, т. е. на пучках, у которых во время опытов не наблюдается общих деформаций, характеризующих смещением модельных бревен относительно друг друга.

Кроме того, при моделировании по критерию Фруда следует соблюдать критерий Струхаля в автомоделной области чисел Рейнольдса.

При этом местные деформации древесины в зоне контакта пучка с рабочим органом механизма практически не оказывают влияния на процесс взаимодействия. Общие же деформации пучка смоделировать довольно сложно. Поэтому влияние их на процесс взаимодействия пучка с механизмом целесообразней исследовать в натуральных условиях.

Полученные результаты найдут применение при изучении динамического взаимодействия плавающих лесоматериалов с рейдовыми сортировочно-формировочными механизмами.

ЛИТЕРАТУРА

- [1]. Алабужев П. М. Теория подобия и размерностей. Моделирование.— М.: Высш. школа, 1968.— 208 с. [2]. А. с. 569515 (СССР). Устройство для остановки плывущих пучков бревен на сплавных рейдах/ Арханг. лесотехн. ин-т им. В. В. Куйбышева; Авт. изобрет. Г. Я. Суров, К. А. Чекалкин.— Заявл. 27.04.76, № 2353897/11; Оpubл. в Б. И., 1977, № 31, с. 53. [3]. Митрофанов А. А. Исследование гидродинамических и инерционных характеристик плотов при остановке: Автореф. дис. . . . канд. техн. наук.— Красноярск, 1974.— 20 с. [4]. Назаров Л. Г. О механическом подобии твердых тел (к теории моделирования).— Ереван: АН АрмССР, 1965.— 218 с. [5]. Седов Л. И. Методы подобия и размерности в механике.— М.: Наука, 1977.— 440 с. [6]. Суров Г. Я. Динамическое взаимодействие плавающего пучка бревен с рейдовыми сортировочно-формировочными механизмами: Автореф. дис. . . . канд. техн. наук.— Минск, 1981.— 17 с. [7]. Тимошенко С. П., Лессельс Д. Прикладная теория упругости: Пер. с англ.— 2-е изд.— Л.: Гостехиздат, 1931.— 392 с. [8]. Федяевский К. К. Гидромеханика.— Л.: Судостроение, 1968.— 568 с.

Поступила 11 сентября 1984 г.