

ОЦЕНКА МАКСИМАЛЬНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В УПРУГОЙ ПЛАСТИНЕ ПРИ УДАРЕ ПО НЕЙ ПОВЕРХНОСТНОЙ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ ВОЛНОЙ

А.А. Коробкин, Т.И. Хабахпашева*

*Институт гидродинамики им. М.А.Лаврентьева СО РАН,
Новосибирск, Россия*

Рассматривается плоская нестационарная задача об ударе упругой пластиной конечной длины о поверхность идеальной несжимаемой жидкости. Пластина, которая является днищем жесткой конструкции, движущейся вертикально с постоянной скоростью, моделируется балкой Эйлера. Срезающие напряжения и напряжения в поперечном направлении не учитываются. Течение жидкости предполагается плоским и потенциальным. Граничные условия на поверхности жидкости линеаризуются и сносятся на горизонтальную линию, проходящую через ось. Параметром линеаризации является отношение длины пластины к радиусу кривизны свободной границы в вершине волны. Предполагается, что поверхность жидкости имеет синусоидальную форму. Исследуются различные случаи удара:

- “центральный” (гребень волны совпадает с центром пластины),
- удар гребнем волны по краю пластины,
- “удар впадиной” (центр пластины находится между двух гребней, необязательно строго посередине).

В последнем случае образуются две области контакта пластина–жидкость и каверна между ними. Наличие воздуха в каверне не учитывается.

Весь процесс удара может быть условно разделен на две стадии: ударную стадию и стадию погружения. Ударная стадия очень непродолжительна. Однако в это время гидродинамические нагрузки на пластину велики и зависят от скорости движения точек контакта пластина–жидкость. Показано, что в зависимости от упругих свойств пластины и начальной геометрии свободной поверхности возможны случаи, когда в рамках модели несжимаемой жидкости эти скорости бесконечно возрастают, что ведет к неограниченному росту гидродинамических нагрузок на пластину – явлению блокировки.

Это явление первоначально было отмечено при исследовании задачи об ударе вершиной волны в край упругой пластины. Явление обусловлено таким изменением формы пластины, что ее поверхность в области точки контакта становится практически параллельной свободной поверхности жидкости. Однако при “ударе по впадине” всегда можно выделить момент, когда пластина параллельна поверхности жидкости, поэтому такой удар будет наиболее “жестким”. Отметим, что независимо от начальной геометрии поверхности жидкости, прогиб пластины в конце ударной стадии еще очень мал и напряжения не достигают своих максимальных значений.

В момент, когда пластина смочена полностью, наступает стадия погружения. Гидродинамические нагрузки на пластину резко падают и уже не могут быть классифицированы как ударные. Колебания пластины происходят за счет потенциальной энергии упругих деформаций, а также кинетической энергии пластины и жидкости, накопленных за время ударной стадии. Расчеты показали, что в суммарной энергии в конце ударной стадии доля потенциальной энергии балки не превышает 10%, кинетической энергии пластины – 25%, а остальная энергия соответствует кинетической энергии, накопленной в жидкости.

Основная серия расчетов проводилась для данных эксперимента, проведенного в MARINTEK (Норвегия) [5] и длины волны, равной $4/3$ длины пластины. В безразмерных переменных ($U_* = 2U / [(VL)^2 \rho]$), где U – суммарная энергия, V – скорость удара и

последующего погружения пластины, L – ее длина, а ρ – плотность жидкости) значение суммарной энергии менялось от 1.21 в случае центрального удара, до 1.27 в случае симметричного “удара по впадине”. То есть расхождение значений не превысило 5% и влияние начальной геометрии свободной поверхности на результирующую энергию относительно мало. Численные исследования показали, что максимальные напряжения в пластине достигаются в тот момент, когда вся накопленная на ударной стадии энергия переходит в потенциальную энергию пластины. Отсюда, не производя расчетов для стадии погружения, можно получить достаточно точную оценку сверху максимальных напряжений в пластине:

$$\sigma_{\max} = \sqrt{U_*} \frac{Vh}{2} \sqrt{\frac{\rho EL}{J}}$$

Здесь h – толщина пластины, E – модуль Юнга, а J – момент инерции поперечного сечения пластины.

Как видно из этой формулы, радиус кривизны в вершине волны явно не влияет на значение максимальных напряжений. Также показано, что момент их достижения также мало зависит от начальной геометрии свободной поверхности и радиуса кривизны волны. Это подтверждает гипотезу Фалтинцена [4], сделанную на основе экспериментальных данных, о том, что геометрические параметры поверхности жидкости слабо влияют на величину и время достижения максимальных напряжений в пластине.

В результате, для оценки максимальных напряжений можно предложить такой путь: сперва провести расчеты прогиба и скоростей точек пластины вплоть до конца ударной стадии для простейшего случая (например, для центрального удара), а затем подставляя значение накопленной энергии в приведенную выше формулу получить σ_{\max} с точностью до 3%.

Данная работа поддержана РФФИ (грант 96-01-01767) и СО РАН (грант ИГ-43-97).

Список литературы

1. Коробкин А.А. Плоская задача о симметричном ударе волной по балке Эйлера // ПТМФ. 1998. Т.39, N.5.
2. Коробкин А.А., Хабахпашева Т.И. Несимметричный удар волной по упругой пластине // ПТМФ. 1998. Т.39, N.5.
3. Коробкин А.А., Хабахпашева Т.И. Плоская линейная задача о погружении упругой пластины в идеальную несжимаемую жидкость // ПТМФ (принято в печать).
4. Faltinsen O.M. Slamming // Advances in Ship and Offshore Hydrodynamics /V. Bertram (ed.). 1996. N.561. P. 21-30.
5. Faltinsen O. M., Kvaalsvold J., Aarsnes J.V. Wave impact on a horizontal elastic plate // J.Marine Science and Technology. 1997. V. 2. No. 2. P. 87-100.