ФИЗИЧЕСКИЕ ПОЛЯ КОРАБЛЯ

DOI: 10.24937/2542-2324-2021-2-396-105-112
УДК 534.121.1

В.Ю. Кирпичников, А.А. Петров, В.В. Савенко, Ю.Ф. Шлемов
ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург, Россия

ВИБРАЦИИ ОБТЕКАЕМОЙ ПЕРФОРИРОВАННОЙ ПЛАСТИНЫ

Объект и цель научной работы. Исследование условий возникновения гидроупругих автоколебаний перфорированной пластины, обтекаемой «скользящим» потоком.
Материалы и методы. Измерения уровней вибрации обтекаемой пластины. Анализ физической природы максимумов в частотных спектрах вибрации.
Основные результаты. Определены условия возникновения гидроупругих автоколебаний при обтекании перфорированной пластины.
Заключение. Разработаны предложения по недопущению возникновения гидроупругих автоколебаний при обтекании «скользящим» водным потоком судовых конструкций, в состав которых входят перфорированные пластины.
Ключевые слова: обтекаемая потоком пластина с отверстиями, частотные спектры вибрации, гидроупругие автоколебания.
Авторы заявляют об отсутствии возможных конфликтов интересов.

SHIP SIGNATURES

DOI: 10.24937/2542-2324-2021-2-396-105-112
UDC 534.121.1

V. Kirpichnikov, A. Petrov, V. Savenko, Yu. Shlemov
Krylov State Research Centre, St. Petersburg, Russia

VIBRATIONS OF PERFORATED PLATE IN FLOW

Object and purpose of research. A study of inception conditions for hydroelastic self-induced vibrations of perforated plate in slip flow.
Materials and methods. Vibration spectra measurements of plate in flow. Analysis of physical nature of vibration frequency spectra maximums.
Main results. Inception conditions for hydroelastic self-induced vibrations of perforated plate in slip flow were determined.
Conclusion. Proposals for prevention the inception of hydroelastic self-induced vibrations in ship structures including perforated plates in water slip flow were formulated.
Keywords: perforated plate in flow, vibration frequency spectra, hydroelastic self-induced vibration.
The authors declare no conflicts of interest.

Введение
Introduction

В частотных спектрах вибрации и шумоизлучения обтекаемых корпусных конструкций судов могут присутствовать интенсивные тональные (дискретные) составляющие. Их появление в ряде случаев обусловлено автоколебательными процессами, возникающими при обтекании отверстий в наружной обшивке конструкций.

Известны три разновидности автоколебаний – гидродинамические, гидроупругие и гидрорезонансные. Терминология, принятая при обтекании конструкций водным потоком, далее сохраняется

Для цитирования: Кирпичников В.Ю., Петров А.А., Савенко В.В., Шлемов Ю.Ф. Вибрации обтекаемой перфорированной пластины. Труды Крыловского государственного научного центра. 2021; 2(396): 105–112.
For citations: Kirpichnikov V., Petrov A., Savenko V., Shlemov Yu. Vibrations of streamlined perforated plate. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2021; 2(396):105–112 (in Russian).

и для случая их обтекания воздухом. Физическую суть появления автоколебаний можно представить следующим образом.

При обтекании отверстия с его передней кромки срывается вихрь, который переносится вниз по потоку и взаимодействует с задней кромкой отверстия. Такой процесс получил название гидродинамических автоколебаний. Он характеризуется небольшой, в сравнении с гидроупругими и гидрорезонансными автоколебаниями, интенсивностью, низкой добротностью и быстрым затуханием турбулентных пульсаций давления (ТПД) с удалением от отверстия. В силу локальности принципиального влияния на уровни вибрации и шумоизлучения корпусных конструкций судов гидродинамические автоколебания не оказывают.

Вместе с тем повышенные уровни ТПД при гидродинамических автоколебаниях могут быть причиной возникновения резонансных явлений как в обтекаемой пластине с отверстием, так и в соседних с ней элементах конструкции, а также в объеме полости за отверстием.

Наибольшие уровни вибрации и шумоизлучения наблюдаются при совпадении резонансных частот изгибных колебаний пластинчатых элементов конструкции (гидроупругие автоколебания) или резонансных частот объема полости (гидрорезонансные автоколебания) с так называемой частотой Струхаля f_{S1} или с частотами ее низших гармоник f_{S2} и f_{S3}.

Частоты f_{Sn} (n = 1, 2, 3) могут быть определены с использованием формулы

$$f_{Sn} = Sh_n U/a \,, \qquad (1)$$

где Sh_n – число Струхаля, $Sh_n = c\,(n - 0{,}25)$, c = 0,5–0,7 [1] или $c = 3/\sqrt{U}$ [2] при n = 1; U – скорость потока, м/с; a – размер отверстия в направлении потока, м.

Возникающая при указанном совпадении частот резонирующая колебательная система характеризуется повышенной интенсивностью и высокой добротностью автоколебаний. Она становится основным элементом, управляющим срывом вихрей с отверстия, вследствие чего частота автоколебаний практически не зависит от скорости потока. Соответствующее явление, называемое «захватом частоты», продолжает существовать до тех пор, пока при изменении скорости рассогласование между резонансными частотами колебаний пластины или объема полости с частотами Струхаля не достигает некоторой величины, при которой автоколебания прекращаются («срываются»). Условия возникновения автоколебаний пластинчатых и оболочечных конструкций с одиночным отверстием изучались при их обтекании как водой [1], так и воздухом [2, 3]. При этом исследовались конструкции, имеющие лишь одно отверстие. Вместе с тем практический интерес представляют условия возникновения автоколебаний при обтекании конструкций с несколькими отверстиями или с большим их количеством, в частности при обтекании перфорированной пластины. Действительно, замена на пластине одиночного отверстия большим числом отверстий с примерно такой же общей площадью, но с существенно меньшим размером, при одной и той же скорости движения будет способствовать повышению струхалевских частот. Это может исключить их совпадение с низшими резонансными частотами колебаний обтекаемого пластинчатого элемента и расположенной за ним полости. Однако не будут ли при этом возникать не менее интенсивные гидроупругие и (или) гидрорезонансные автоколебания на более высоких резонансных частотах?

Целью настоящей работы являлось экспериментальное исследование уровней вибрации обтекаемой перфорированной пластины в малошумной аэродинамической трубе Крыловского государственного научного центра. Испытания проведены в широком диапазоне скорости потока от 20 до 50 м/с при малом шаге (1 м/с) ее изменения. Основное внимание уделено гидроупругим автоколебаниям пластины.

Исследуемая пластина

Plate under study

Схема стальной перфорированной пластины приведена на рис. 1. Размеры пластины в плане 0,52×0,38 м, толщина – $1{,}5\cdot10^{-3}$ м. На пластине имеется 35 отверстий диаметром 0,03 м. Общая площадь отверстий составляет примерно 9 % площади пластины.

Отверстия располагаются в шахматном порядке. Ширина 9 промежуточных полос между 10 полосами с отверстиями составляет 0,02 м, а двух крайних полос – 0,027 м.

Расстояние геометрического центра отверстий от наиболее длинных кромок пластины равняется:

- №№ 1, 4, 8, 11, 15, 18, 22, 25, 29, 32 – $4{,}62\cdot10^{-2}$ м;
- №№ 5, 7, 12, 14, 19, 21, 26, 28, 33, 35 – $9{,}25\cdot10^{-2}$ м;
- №№ 2, 3, 9, 10, 16, 17, 23, 24, 30, 31 – $13{,}87\cdot10^{-2}$ м;
- №№ 6, 13, 20, 27, 34 – 0,19 м.

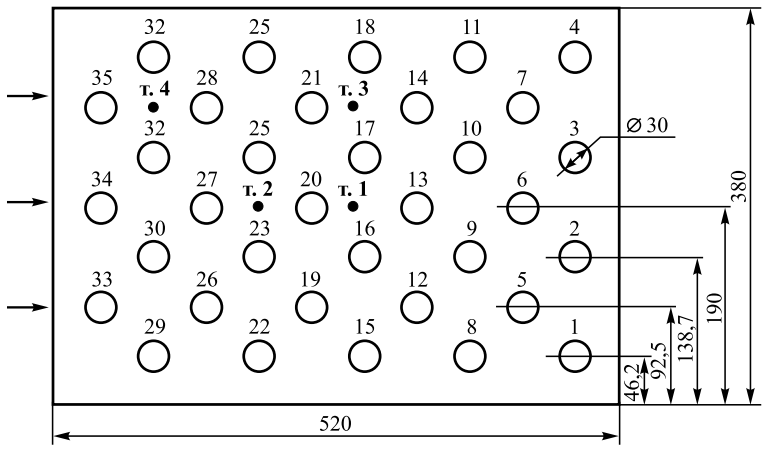


Рис. 1. Схема перфорированной пластины

Fig. 1. Perforated plate layout

Для исключения засасывания воздуха в аэродинамическую трубу через отверстия в пластине испытания проводились при ее нахождении в полости с размерами 0,6×0,5×0,1 м. Боковыми стенками полости являлись жесткие стальные подкрепления стенки рабочего участка аэродинамической трубы. На них закреплялась стенка (условно – задняя) полости, параллельная испытанной пластине. Материал задней стенки – пенополиуретан, толщина – $5 \cdot 10^{-3}$ м. Фотография части рабочего участка трубы с задней стенкой полости приведена на рис. 2 (см. вклейку).

Учитывая возможность усиления негативного влияния отверстий на вибрацию пластины при возникновении гидрорезонансных и гидроупругих автоколебаний в полости, выполнялись расчетная оценка низшей резонансной частоты воздушного объема, а также экспериментальное определение резонансных частот изгибных колебаний задней стенки. Установлено отсутствие влияния колебаний объема и задней стенки на вибрации перфорированной пластины.

Прогнозирование условий возникновения автоколебаний

Prediction of self-induced vibrations inception conditions

Выполнялись расчеты частот Струхаля f_{Sn} и резонансных частот f_{qn} изгибных колебаний пластины (q и n – числа полуволн вдоль длинной и короткой кромок соответственно).

Вычисления частот Струхаля проводились с использованием формулы (1). Диапазоны значений f_{Sn} для случая обтекания одиночного круглого отверстия диаметром $a = 0{,}03$ м оказались следующими:

- при скорости $U = 20$ м/с – $250 \text{ Гц} \le f_{S1} \le 350 \text{ Гц}$, $583 \text{ Гц} \le f_{S2} \le 816 \text{ Гц}$, $917 \text{ Гц} \le f_{S3} \le 1283 \text{ Гц}$;
- при скорости $U = 50$ м/с – $530 \text{ Гц} \le f_{S1} \le 875 \text{ Гц}$, $770 \text{ Гц} \le f_{S2} \le 1458 \text{ Гц}$, $1210 \text{ Гц} \le f_{S3} \le 1694 \text{ Гц}$;
- в диапазоне скоростей от 20 до 50 м/с – $250 \text{ Гц} \le f_{S1} \le 875 \text{ Гц}$, $583 \text{ Гц} \le f_{S2} \le 1458 \text{ Гц}$, $917 \text{ Гц} \le f_{S3} \le 1694 \text{ Гц}$.

Вычисления резонансных частот f_{qn} и форм изгибных колебаний пластины выполнялись в предположении отсутствия на ней отверстий (их малое, непринципиальное для рассматриваемого вопроса влияние на значения низших резонансных частот f_{qn} было подтверждено результатами испытаний и расчетной оценкой изменения отверстий изгибной жесткости пластины [4]). Учитывалось, что кромки пластины при ее установке в стенку аэродинамической трубы закрепляются болтами на специальной монтажной рамке.

Расчетные значения 9 низших резонансных частот f_{qn} изгибных колебаний пластины при ее нахождении в воздухе содержатся в табл. 1.

Сопоставление расчетных значений f_{Sn} и f_{qn} показывает невозможность возникновения гидроупругих автоколебаний на 5 низших резонансных частотах (f_{11}, f_{21}, f_{12}, f_{31}, f_{22}) изгибных колебаний пластины. Действительно, их значения оказываются меньше низшего значения частоты Струхаля $f_{S1} = 250$ Гц, соответствующего скорости $U = 20$ м/с.

Возникновение автоколебаний на любой более высокой резонансной частоте (f_{32}, f_{41}, f_{13}, f_{23} и т.д.) можно считать вполне возможным. Это подтвер-

Таблица 1. Резонансные частоты f_{qn}, Гц, изгибных колебаний пластины при ее нахождении в воздухе
Table 1. Resonant frequencies (f_{qn}, Hz) of plate bending vibrations in air

Способ определения	f_{11}	f_{21}	f_{12}	f_{31}	f_{22}	f_{32}	f_{41}	f_{13}	f_{23}	f_{42}	f_{51}
Расчет	73	118	175	194	217	289	294	325	366	–	–
Измерение, пластина с отверстиями	68	109	165	178	207	269	276	305	348	367	394
Измерение, пластина без отверстий	69	119	165	196	220	274	292	320	357	372	394

ждает попадание значений f_{qn} в диапазоны струхалевских частот, соответствующих скоростям обтекания от 20 до 50 м/с.

Анализ результатов измерений
Measurements results analysis

Были выполнены два этапа измерений вибрационных характеристик пластины. На первом определялись резонансные частоты изгибных колебаний, а на втором измерялись уровни вибрации пластины при обтекании потоком.

1. Резонансные частоты изгибных колебаний пластины определялись после ее монтажа в стенку рабочего участка аэродинамической трубы и установки задней стенки полости. Измерялись спектры входной вибровозбудимости пластины при ударе по ней вибромолотком. Под входной вибровозбудимостью подразумевается уровень виброускорения в точке возбуждения, выраженный в дБ относительно порогового значения 10^{-6} м/с^2 и соответствующий силе 1 Н. Измерения выполнялись в 4 точках (рис. 1). Точка *1* находилась в зоне геометрического центра (ГЦ) пластины, точки *2* и *3* – вблизи срединных линий, параллельных длинной (точка *2*) и короткой (точка *3*) кромкам пластины на расстояниях от передней короткой и боковой кромок около 0,19 и 0,1 м соответственно. Точка *4* находилась вблизи диагонали пластины на примерно одинаковом (~0,1 м) расстоянии от ее кромок. Все точки измерения находились в зоне ГЦ участков пластины между 4 ближайшими отверстиями.

Спектр входной вибровозбудимости пластины в одной из точек (*4*) измерения изображен кривыми *1* на рис. 3 (см. вклейку). Над максимумами вибровозбудимости указаны значения резонансных частот. Значения f_{qn} с учетом частот максимумов, обнаруженных при измерениях вибровозбудимости пластины в других точках, приведены в табл. 1, куда включены также значения резонансных частот f_{qn} изгибных колебаний исследуемой пластины, зарегистрированные при ее испытаниях до высверливания отверстий.

Анализ приведенных в табл. 1 значений f_{qn} показывает, что:

- измеренные значения резонансных частот изгибных колебаний перфорированной пластины оказываются меньше их расчетных значений в среднем по десяти низшим значениям f_{qn} на 7 %;
- перфорация пластины понижает, согласно измерениям, резонансные частоты ее изгибных колебаний в среднем на 4 %.

2. Наибольший уровень (161 дБ) вибрации пластины при ее обтекании потоком был зарегистрирован в точке *4* на частоте 348 Гц. Спектры вибрации пластины в этой точке в диапазонах, ограниченных сверху частотами 1600 Гц (*a*) и 400 Гц (*b*), приведены на рис. 3.

Обращаясь к рисунку, видим, что кроме указанного максимума в спектрах вибрации пластины наблюдаются максимумы с существенно меньшим уровнем на частотах приблизительно 410 Гц (133 дБ), 696 Гц (132 дБ) и 1044 Гц (124 дБ). Уровни других максимумов вибрации на резонансных частотах пластины не превосходят ~120 дБ.

Анализ показал, что максимумы вибрации на частотах 348 (рис. 4, см. вклейку), 696 и 1044 Гц возникают при обтекании пластины с одной и той же скоростью 30 м/с. Их появление с высокой степенью вероятности связано с возбуждением пластины потоком на частоте Струхаля f_{S1} и на частотах ее первой f_{S2} и второй f_{S3} гармоник. Согласно расчету, значения струхалевских частот при обтекании одиночного круглого отверстия диаметром 0,03 м потоком со скоростью $U = 30$ м/с находятся в диапазонах 280–393, 653–916 и 1026–1440 Гц. Именно в эти диапазоны и попадают частоты указанных максимумов вибрации пластины при ее обтекании со скоростью 30 м/с.

Были измерены распределения по поверхности пластины уровней смещения на резонансной частоте 348 Гц. Оказалось, что пластина колеблется с формой, имеющей две полуволны вдоль длинной и три полуволны вдоль короткой кромок пластины. Многие отверстия в пластине находятся вблизи пучностей этой формы, а ниже по течению от некоторых из отверстий располагается другая пучность. Расчетное значение резонансной частоты f_{23} этой формы колебаний (рис. 5) пластины без отверстий с принятой схемой крепления к монтажной рамке составило 366 Гц. Точки *2* и *4*, в которых при обтекании пластины были зарегистрированы ее гидроупругие автоколебания на частоте 348 Гц с наибольшим уровнем, находились вблизи зон пучностей указанной формы колебаний.

В спектрах вибрации, измеренной во всех точках, присутствовал, как указывалось, максимум с частотой 410 Гц. Наибольший уровень этого максимума был зарегистрирован при скорости обтекания 32 м/с. Согласно расчету, значение частоты Струхаля f_{S1} при обтекании одиночного отверстия диаметром 0,03 м при указанной скорости потока находится в диапазоне 299–419 Гц. Именно в этот диапазон попадает резонансная частота 410 Гц. Экспериментально было установлено, что резонансная форма колебаний на указанной частоте имеет три пучности как вдоль, так и поперек потока. Как и ранее, в зонах пучностей указанной формы имеются отверстия, а за некоторыми из них вниз по потоку находится другая пучность. Возможной причиной появления максимума вибрации с частотой 410 Гц также является совпадение f_{S1} с низшей резонансной частотой участков пластины, находящихся между ближайшими друг к другу 4 отверстиями. Спектры входной вибровозбудимости, измеренные в ГЦ всех 12 подобных участков, содержали интенсивный резонансный максимум с частотой ~410 Гц при мало отличающемся уровне. Сказанное подтверждает соизмеримость размеров этих участков в плане при толщине пластины $1{,}5\cdot10^{-3}$ м с половиной длины $\lambda_{изг}$ изгибной волны в пластине на частоте 410 Гц ($\lambda_{изг} \approx 0{,}18$ м).

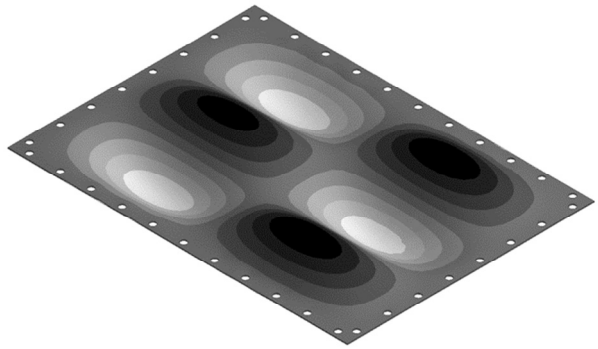


Рис. 5. Форма колебаний пластины на резонансной частоте 366 Гц

Fig. 5. Plate vibration mode on resonant frequency 366 Hz

Прогнозирование гидроупругих колебаний перфорированных пластин, обтекаемых водным потоком

Prediction of hydroelastic self-induced vibrations of perforated plates in water flow

Водная среда, как известно, уменьшает резонансные частоты изгибных колебаний пластин судовых конструкций [5, 6]. На частоты Струхаля f_{Sn} в соответствии с выражением (1) она влияния не оказывает.

Сопоставлялись измеренные значения частот f_{qn} изгибных колебаний исследуемой перфорированной пластины при ее нахождении в воздухе и в воде. Типичные спектры входной вибровозбудимости (точка *1*) пластины изображены на рис. 6 (см. вклейку) кривыми *1* и *2* соответственно. Значения резонансных частот f_{qn} приведены в табл. 2.

Таблица 2. Резонансные частоты (в Гц) изгибных колебаний пластины при ее нахождении в воздухе (f_{qn}) и в воде ($f_{qn}^{в}$)

Table 2. Resonant frequencies (Hz) of plate bending vibrations in air (f_{qn}) and in water ($f_{qn}^{в}$)

Способ определения, среда	f_{11}	f_{21}	f_{12}	f_{31}	f_{22}	f_{32}	f_{41}	f_{13}	f_{23}	f_{42}	f_{51}	f_{33}
Измерение, f_{qn}, воздух	68	109	165	178	207	269	276	305	348	367	394	410
Измерение, $f_{qn}^{в}$, вода	34	52	77	83	101	128	143	164	178	190	196	236
Расчет, $f_{qn}^{в}$, вода	24	45	74	84	99	137	143	158	186	200	220	227

Анализ приведенной информации показывает, что значения f_{qn} в воде меньше, чем в воздухе, в среднем по 12 частотам примерно в 2,2 раза. С учетом этого можно ожидать, что при нахождении исследуемой пластины в воде ее гидроупругие колебания на частотах f_{23} и f_{33} могут возникнуть при скоростях ~13,6 и ~14,5 м/с соответственно. Гидроупругие автоколебания на более низких резонансных частотах прогнозируются при меньших скоростях обтекания. На низшей резонансной частоте $f_{11} = 34$ Гц их появление при нахождении пластины в воде возможно при скорости $U_{\min} \approx 2{,}9$ м/с. При меньших скоростях гидроупругие автоколебания исследуемой пластины при обтекании водным потоком, согласно выполненной оценке, не возникнут.

Повышение минимальной скорости $U_{\min}$ возникновения гидроупругих автоколебаний перфорированной пластины с указанными размерами в плане и отверстиями диаметром 0,03 м может быть достигнуто увеличением ее толщины. Учитывая, что расчет f_{qn} колебаний пластины при отсутствии отверстий дает достаточно точные значения низших резонансных частот перфорированной пластины, увеличение $U_{\min}$ можно считать пропорциональным росту толщины пластины. При увеличении толщины в 5 раз минимальная скорость возникновения гидроупругих автоколебаний пластины с такими же, как испытанная, размерами в плане и отверстиями диаметром 0,03 м составит ~14,5 м/с.

Прогнозирование условий возникновения гидроупругих автоколебаний перфорированных пластин с другими размерами может быть выполнено, в частности, путем расчетной оценки значений f_{Sn} и резонансных частот $f_{qn}^{\text{в}}$ при нахождении пластин в воде. Значения $f_{qn}^{\text{в}}$ могут быть вычислены с использованием формулы

$$f_{qn}^{\text{в}} = \frac{f_{qn}}{\sqrt{1 + K_{\text{перф}} \dfrac{\rho^{\text{в}}}{K_{qn}\rho_{\text{пл}}h_{\text{пл}}}}}, \qquad (2)$$

где f_{qn} – расчетные значения резонансных частот пластины в воздухе при предположении отсутствия на ней отверстий; значения f_{qn} могут быть вычислены с использованием сертифицированных программ или по известным формулам [5, 6]; $K_{\text{перф}}$ – коэффициент, учитывающий влияние перфорации; $\rho^{\text{в}}$ – плотность воды; K_{qn} – волновое число изгибных колебаний пластины на резонансной частоте f_{qn}, $K_{qn} = \pi\sqrt{\dfrac{q^2}{\ell_1^2} + \dfrac{n^2}{\ell_2^2}}$; $\rho_{\text{пл}}$ – плотность материала пластины; $h_{\text{пл}}$ – толщина пластины.

Выражение в знаменателе формулы (2) отражает влияние на $f_{qn}^{\text{в}}$ присоединенной массы воды, а коэффициент $K_{\text{перф}}$ – влияние перфорации на присоединенную массу.

Была выполнена проверка работоспособности формулы (2) путем проведения расчетов $f_{qn}^{\text{в}}$ для исследуемой пластины. По результатам измерений f_{qn} и $f_{qn}^{\text{в}}$ испытанной пластины было установлено, что перфорация уменьшает величину присоединенной массы воды в среднем по частотам f_{qn} в диапазоне до $f_{qn} \le 410$ Гц в 1,25 раза ($K_{\text{перф}} = 0{,}8$).

Расчетные значения $f_{qn}^{\text{в}}$ по формуле (2) приведены в табл. 2. Видим, что наибольшую погрешность предложенная формула имеет при расчете низших частот f_{11} и f_{21}. Средняя погрешность расчета значений резонансных частот более высокого порядка составляет ~4 %.

В случае если перфорированная пластина имеет такие же отверстия и размеры в плане, как исследуемая, но другую толщину, то расчет резонансных частот $(f_{qn}^{\text{в}})_h$ при ее нахождении в воде можно выполнить с использованием приближенной формулы

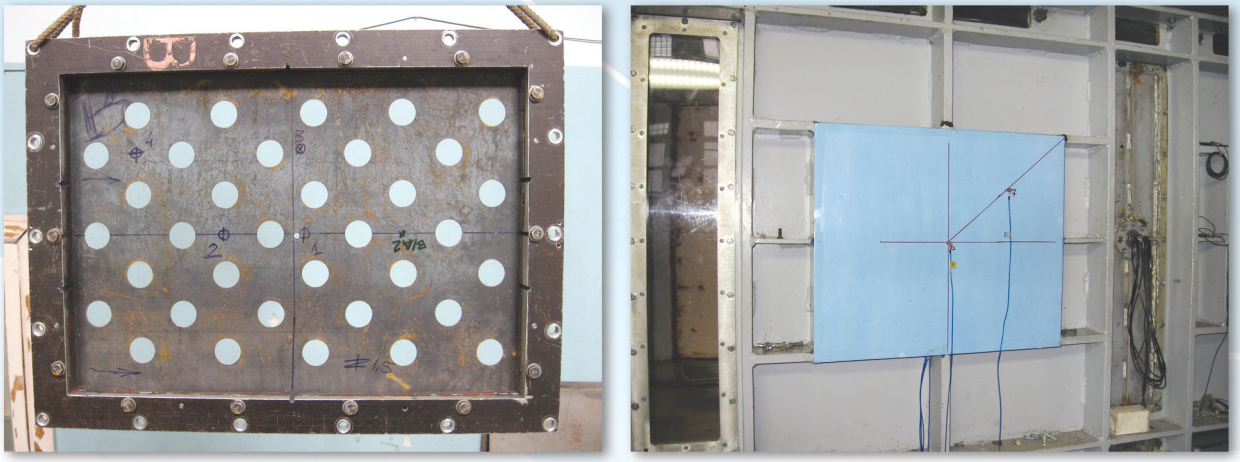
$$(f_{qn}^{\text{в}})_h = 0{,}61(f_{qn}^{\text{в}})_{1{,}5}\sqrt{\frac{h^3}{1 + 0{,}17h}}, \qquad (3)$$

где $(f_{qn}^{\text{в}})_{1{,}5}$ – резонансная частота пластины толщиной 1,5 мм в воде; h – толщина пластины в мм.

Используя выражение (3), получаем, что резонансные частоты $(f_{qn}^{\text{в}})_h$ пластины, например толщиной 6 мм, превосходят значения резонансных частот пластины толщиной 1,5 мм примерно в 6,3 раза. В воздухе соответствующее соотношение равняется 4.

Для прогнозирования условий возникновения гидроупругих автоколебаний перфорированных пластин, обтекаемых водным потоком, необходимо выполнить вычисления следующих величин:

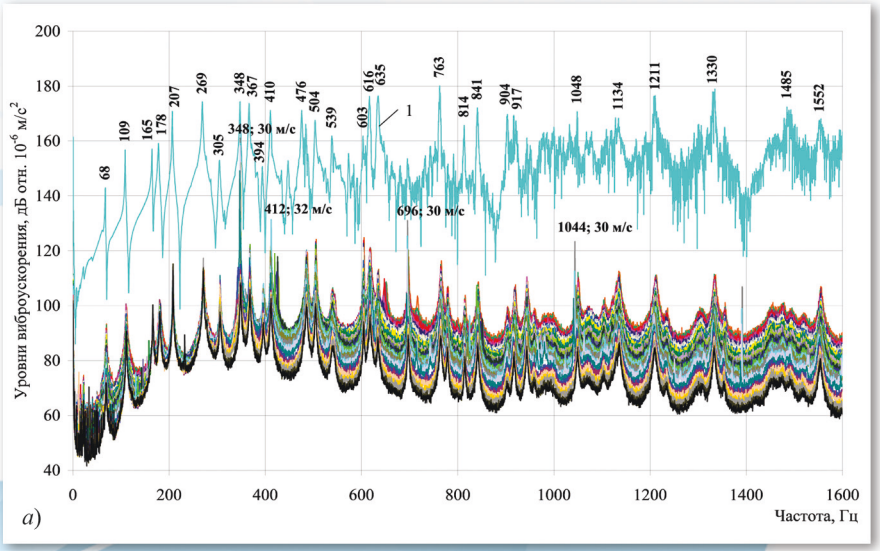
- частоты Струхаля f_{Sn} одиночного отверстия на конкретной скорости движения судна с использованием формулы (1);
- резонансные частоты f_{qn} изгибных колебаний пластины в воздухе без учета наличия на ней отверстий;
- резонансные частоты $f_{qn}^{\text{в}}$ перфорированной пластины в воде с использованием формулы (2);
- скорость U_{qn}, на которой могут возникнуть гидроупругие колебания с частотой $f_{qn}^{\text{в}}$ по формуле



a) *b*)

Рис. 2. Фото пластины (*a*) и вид на заднюю стенку полости (*b*)

Fig. 2. Photograph of the plate (*a*) and view of the cavity back wall (*b*)



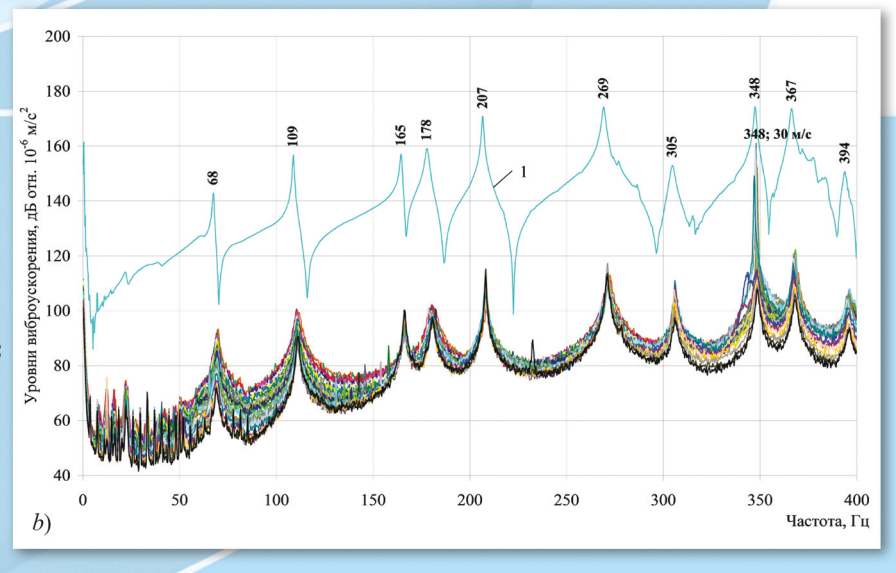


Рис. 3. Спектры входной вибровозбудимости (кривая 1) и вибрации (точка 4) перфорированной пластины при ее обтекании в диапазоне частот:
a) от 0 до 1600 Гц;
b) от 0 до 400 Гц

Fig. 3. Input vibration excitation (curve 1) and vibration spectra of the perforated plate (point 4) in flow at frequency range:
a) from 0 to 1600 Hz;
b) from 0 to 400 Hz

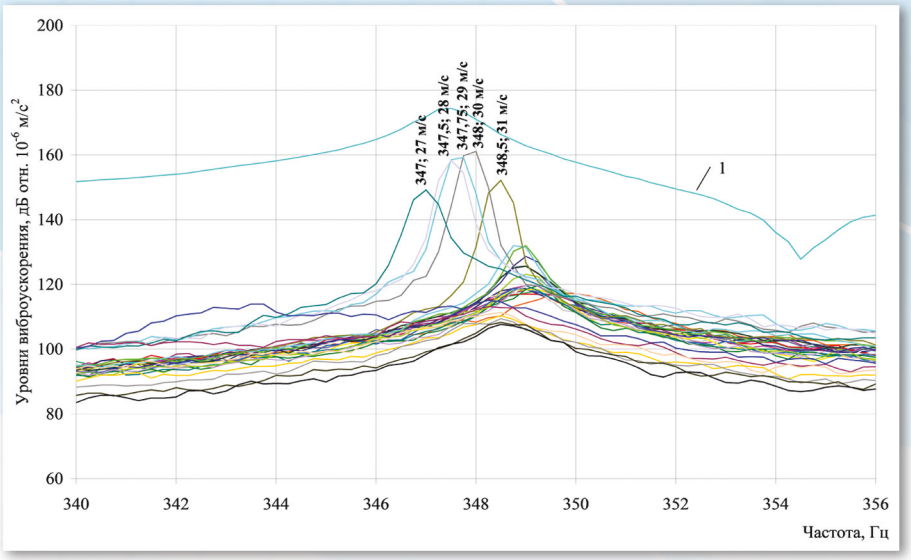
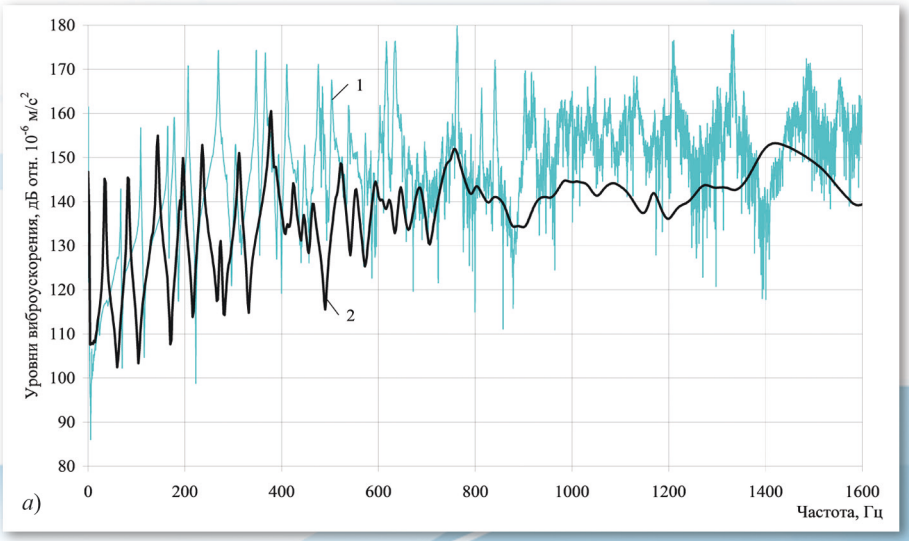


Рис. 4. Спектры входной вибровозбудимости (кривая 1) и вибрации перфорированной пластины (точка 4) при ее обтекании

Рис. 4. Input vibration excitation (curve 1) and vibration spectra of the perforated plate (point 4) in flow



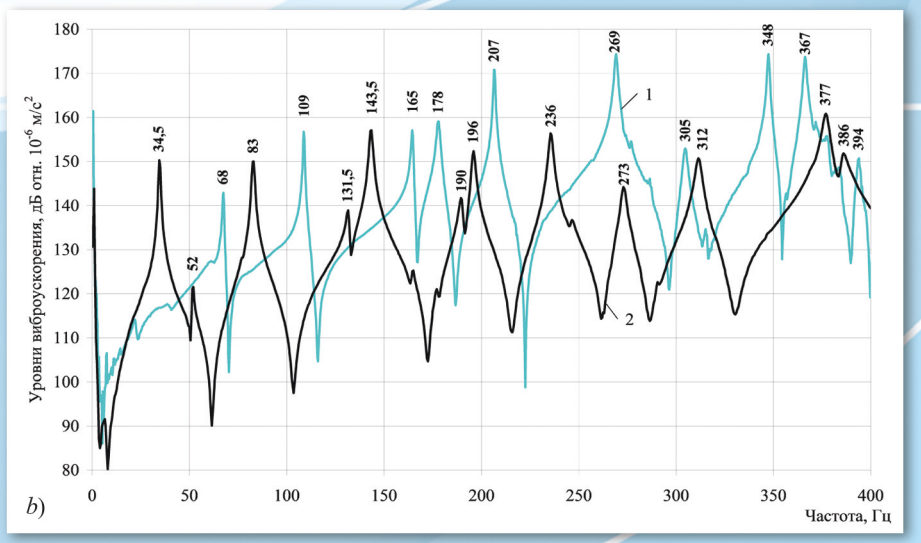


Рис. 6. Спектры входной вибровозбудимости перфорированной пластины при нахождении в воздухе (1) и в воде (2) в диапазоне частот:
a) от 0 до 1600 Гц;
b) от 0 до 400 Гц

Fig. 6. Input vibration excitation spectra of the perforated plate in air (1) and in water (2) at frequency range:
a) from 0 to 1600 Hz;
b) from 0 to 400 Hz

$U_{qn} = f_{qn}^{\text{в}} a/c(n - 0{,}25)$; для низшей резонансной частоты $f_{11} = f_{S1}$ расчет U_{11} может быть выполнен по формуле $U_{11} = 0{,}23(f_{11}a)^2$.

Заключение

Conclusion

Основными результатами выполненной работы являются следующие.

1. Установлено, что при обтекании «скользящим» воздушным потоком перфорированной пластины ее автоколебания с наибольшим уровнем вибрации возникают при совпадении низшей частоты Струхаля f_{S1} с одной из резонансных частот f_{qn} изгибных колебаний пластины, в зонах пучностей формы которой расположены отверстия, а ниже по потоку от них находятся другие пучности той же формы. Несколько меньшие уровни вибрации зарегистрированы при совпадении f_{S1} с низшей резонансной частотой изгибных колебаний участка пластины между 4 соседними отверстиями.
2. Обнаружено, что уровни вибрации перфорированной пластины на резонансных частотах f_{qn}, совпадающих со струхалевскими частотами f_{S2} и f_{S3}, много меньше уровней гидроупругих автоколебаний, возникающих при выполнении условия $f_{qn} = f_{S1}$.
3. Предложено расчетное решение задачи по недопущению возникновения гидроупругих автоколебаний при обтекании перфорированных пластинчатых элементов корпусных конструкций судов «скользящим» водным потоком.

Авторы благодарят за помощь при проведении экспериментов и оформлении статьи А.П. Кощеева, А.А. Гришина, Н.Л. Попова, М.В. Игушкину и Е.В. Яковлеву.

Список использованной литературы

1. *Докучаев О.Н.*, *Котков С.В.*, *Семинов Г.М.* Экспериментальные исследования звукоизлучения обтекаемого тела с внутренней полостью, сообщающейся с наружной средой через отверстие в обтекаемой поверхности // Акустический журнал. 1994. Т. 40, № 3. С. 446–449.
2. Влияние места расположения отверстия в обтекаемой потоком пластине на уровни ее вибрации / *Кирпичников В.Ю.*, *Кощеев А.П.*, *Мукалов Ю.Н.*, *Шлемов Ю.Ф.* // Труды Крыловского государственного научного центра. 2017. Вып. 1(379). С. 128–133.
3. О возникновении и уменьшении максимумов в спектрах вибрации обтекаемой пластины с отверстием / *Кирпичников В.Ю.*, *Кощеев А.П.*, *Мукалов Ю.Н.*, *Шлемов Ю.Ф.* // Труды Крыловского государственного научного центра. 2017. Вып. 3(381). С. 117–122.
4. *Григолюк Э.И.*, *Фильштинский Л.А.* Перфорированные пластины и оболочки. Москва: Наука, 1970. 556 с.
5. *Никифоров А.С.* Акустическое проектирование судовых конструкций. Ленинград: Судостроение, 1990. 198, [1] с.
6. *Кирпичников В.Ю.* Вибрация и шумоизлучение обтекаемых конструкций судна. Санкт-Петербург: Крыловский государственный научный центр, 2016. 210 с.

References

1. *O. Dokuchaev*, *S. Kotkov*, *G. Syominov*. Experimental study of sound radiation by a body with an internal cavity vented to the ambient flow via a hull aperture // Journal of Acoustics. 1994. V. 40, № 3. P. 446–449 (*in Russian*).
2. Effect of the perforation location upon vibration levels of a plate in flow / *V. Kirpichnikov*, *A. Koscheyev*, *Y. Mukalov*, *Y. Shlemov* // Transactions of the Krylov State Research Centre. 2017. № 1(379). P. 128–133 (*in Russian*).
3. On generation and decrease of the maximums in the vibration spectra of the perforated plate in the flow / *V. Kirpichnikov*, *A. Koscheyev*, *Y. Mukalov*, *Y. Shlemov* // Transactions of the Krylov State Research Centre. 2017. № 3(381). P. 117–122 (*in Russian*).
4. *E. Grigolyuk*, *L. Filshtinsky*, Perforated plates and shells. Moscow: Nauka publishing house, 1970. 556 p. (*in Russian*).
5. *A. Nikiforov*. Acoustic design of ship structures. Leningrad: Sudostroyenie, 1990. 198, [1] p. (*in Russian*).
6. *V. Kirpichnikov.* Noise and vibration of ship structures in the flow. St. Petersburg: Krylov State Research Centre, 2016. 210 p. (*in Russian*).

Сведения об авторах

Кирпичников Валерий Юлианович, д.т.н., профессор, главный научный сотрудник ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. Тел.: +7 (812) 415-48-01. E-mail: krylov@krylov.spb.ru.

Петров Александр Александрович, к.ф.-м.н., ведущий инженер ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. Тел.: +7 (812) 415-48-01. E-mail: krylov@krylov.spb.ru.

Савенко Валентин Викторович, к.т.н., старший научный сотрудник, заместитель начальника лаборатории ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес:

196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. Тел.: +7 (812) 415-49-85. E-mail: krylov@krylov.spb.ru.
Шлемов Юрий Фёдорович, заместитель начальника отделения – начальник лаборатории ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. Тел.: +7 (812) 415-45-47. E-mail: krylov@krylov.spb.ru.

About the authors

Valery Yu. Kirpichnikov, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Chief Researcher, Krylov State Research Centre. Address: 44, Moskovskoye sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. Tel.: +7 (812) 415-48-01. E-mail: krylov@krylov.spb.ru.
Alexandr A. Petrov, Cand. Sci. (Phys. & Math.), Lead Engineer, Krylov State Research Centre. Address: 44, Moskovskoye sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. Tel.: +7 (812) 415-48-01. E-mail: krylov@krylov.spb.ru.
Valentin V. Savenko, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Deputy Head of Laboratory, Krylov State Research Centre. Address: 44, Moskovskoe sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. Tel.: +7 (812) 415-49-85. E-mail: krylov@ krylov.spb.ru.
Yuri F. Shlemov, Deputy Head of Division, Head of Laboratory, Krylov State Research Centre. Address: 44, Moskovskoe sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158, Tel.: +7 (812) 415-45-47. E-mail: krylov@krylov.spb.ru.

Поступила / Received: 01.04.21
Принята в печать / Accepted: 19.05.21
© Коллектив авторов, 2021