

УДК 533.6.013.2

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ УДАРНОЙ *N*-ВОЛНЫ С МОДЕЛЯМИ НАЗЕМНЫХ СООРУЖЕНИЙ

К. Б. Соколов

В конической ударной трубе с разрываемой диафрагмой проведено измерение давления у основания моделей двух зданий, находящихся на расстоянии друг от друга от 0,04 до одной длины волны, а также на дне цилиндрического колодца при падении на них под углом 45° ударной *N*-волны интенсивностью 300 Па и длительностью $4 \cdot 10^{-3}$ с. Приведены значения максимальных коэффициентов отражения, полученные при моделировании взаимодействия *N*-волны звукового удара с наземными сооружениями. Приводится описание и конструкция малогабаритного пьезоэлектрического датчика давления.

1. Самолет, движущийся со сверхзвуковой скоростью, является источником возмущений в среде, распространяющихся на значительные расстояния вдоль трассы полета. Поле возмущений образуется благодаря взаимодействию различных частей самолета с потоком воздуха, в результате чего возникает система скачков уплотнения. По мере удаления от самолета поле давления видоизменяется, система скачков уплотнения преобразуется в *N*-образную ударную волну с хорошо выраженными областями сжатия и разрежения (см., например, [1—3]), которую принято называть *N*-волной звукового удара, так как она воспринимается человеком в виде резкого звукового удара. Перепад давлений при отражении *N*-волны звукового удара от земной поверхности (плоской преграды) в два раза больше, чем в падающей *N*-волне, т. е. коэффициент отражения $\Delta \bar{p}_{\max} = \frac{\Delta p_{\max}}{\Delta p_{\phi}} = 2$. Такое значение коэффициента будет существовать для углов падения ударной *N*-волны $\alpha \sim 0 \div 70^\circ$, т. е. для области регулярного отражения [4] и перепадов давления в ее фронте до $\Delta p_{\phi} \sim 2 \cdot 10^3$ Па [5]. С увеличением угла $\alpha > 70^\circ$ (нерегулярное отражение [4]), $\Delta \bar{p}_{\max}$ уменьшается и при значении $\alpha = 90^\circ$, $\Delta \bar{p}_{\max} = 1$ отражение отсутствует.

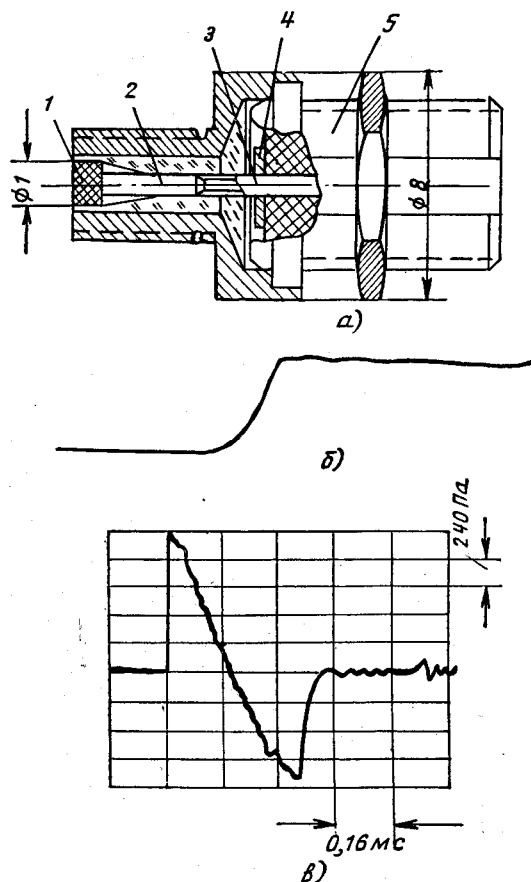
При взаимодействии *N*-волны звукового удара с наземными сооружениями возможно как значительное увеличение коэффициента отражения ($\Delta \bar{p}_{\max} > 2$) [6], так и уменьшение его. В некоторых случаях при взаимодействии *N*-волны звукового удара с препятствием, наблюдаются значительные резонансные колебания ее, приводящие к дополнительному силовому воздействию на сооружение. Около препятствий создается существенно нестационарная картина течения со сложным пространственным распределением давления и плотности газа.

2. Результаты, приведенные в данной работе, получены при испытаниях в конической ударной трубе с разрываемой диафрагмой. Модели размещались на экране, установленном под углом 45° к направлению распространения ударной

N -волны. Интенсивность ударной N -волны в области установки моделей составляла $\Delta p_f \sim 300$ Па при длительности $0,4 \cdot 10^{-3}$ с.

Конструкция датчика типа МПД [6, 7], при помощи которого измерялось давление на моделях, была усовершенствована.

Датчик собран по схеме акустического согласования (см., например, [8, 9]) (фиг. 1). Отличительной особенностью датчика МПД-25 по сравнению с другими конструкциями является то, что его пьезоэлемент 1 через небольшой переходной элемент 2 согласуется непосредственно с электродом 3 разъема 5. Кольцо 4,



а—схема конструктивного исполнения датчика МПД;
б—типичная тарировочная осциллограмма; в—типичная осциллограмма, полученная при измерении давления у основания модели здания простой формы

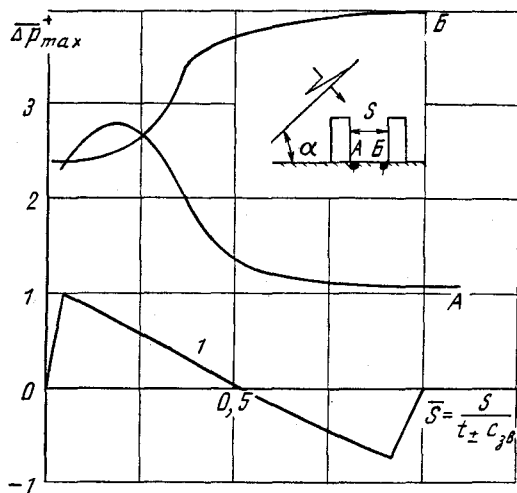
Фиг. 1

припаянное к электроду микроtrakта, улучшает сцепление стержня 2 с корпусом и повышает частотные характеристики датчика. Диаметр чувствительной поверхности датчика 2 мм.

Серия датчика типа МПД-25 была проградуирована на пневматическом устройстве и испытана в ударной трубе. Чувствительность датчиков оказалась не ниже $1 \cdot 10^{-5}$ В/Па. Виброэквиваленты датчика с чувствительностью $3 \cdot 10^{-5}$ В/Па при осевой и поперечной перегрузках соответственно равны: $W_0 \sim 100$ Па/г и $W_n \sim 50$ Па/г. Проводилось исследование влияния температуры окружающей среды на чувствительность датчика. При повышении температуры окружающей среды от 20 до 45° С чувствительность датчика практически не изменяется. Для более низких температур можно воспользоваться данными И. А. Глозмана [10]. В этой работе приведена температурная зависимость величины пьезомодуля для

пьезокерамики $\text{Pb}(\text{Zr}_{0,53}\text{Ti}_{0,47})\text{O}_3$ с добавкой NdO_3 0,5% и NbO_5 0,5% по свойствам близкой к ЦТС-19. Данные приведены для интервала температур от $+20$ до -180°C . В интервале температур от $+20^\circ\text{C}$ до 0 пьезомодуль уменьшается $0,1\%/1^\circ\text{C}$; от 0 до -40°C — $0,25\%/1^\circ\text{C}$.

3. В работе [11] моделировалось взаимодействие N -волны звукового удара с двумя стоящими рядом зданиями разной высоты. В этой работе приводится



1 — изменение давления $\Delta\bar{p}(\bar{S})$ в падающей волне;
 $c_{зв}$ — скорость звука

Фиг. 2

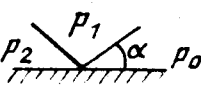
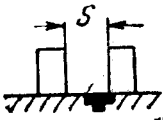
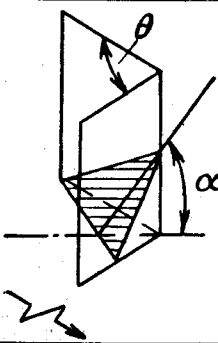
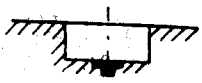
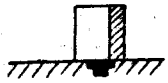
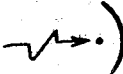
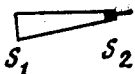
максимальный коэффициент отражения $\Delta\bar{p}_{\text{max}}^+ = 3,5$, полученный при изучении взаимодействия ударной N -волны длительностью $\sim 1,5 \cdot 10^{-3}$ с с моделями указанных зданий. Очевидно, что как максимальные перепады давлений, так и изменение давления во времени у основания зданий (между ними) зависят не только от их высоты, но и от расстояния, на котором они расположены друг от друга.

Из полученных в данной работе зависимостей $\Delta\bar{p}(\bar{t})$ можно проследить влияние волны, отраженной от одного здания, на изменение давления во времени у основания соседнего здания. Это влияние еще очень значительно на расстоянии между зданиями S , равном половине длины волны $-0,5 t_{\pm}$. В случае, когда здания расположены на расстоянии $S = 0,1 t_{\pm}$ и меньше, различие в зависимостях $\Delta\bar{p}(\bar{t})$ практически отсутствует.

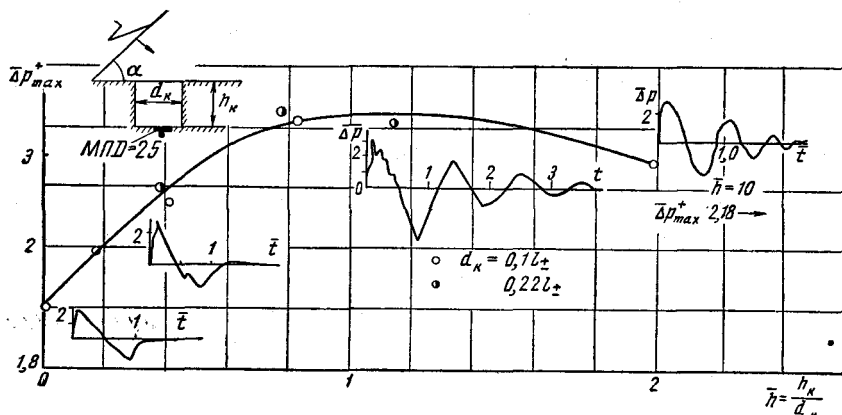
Из зависимостей коэффициента отражения $\Delta\bar{p}_{\text{max}}^+ = \frac{\Delta p_{\text{max}}}{\Delta p_{\text{ф}}}$ от относительного (значок „+“ указывает на фазу сжатия) расстояния между моделями зданий $\bar{S}$ (фиг. 2) видно, что у основания второго (по отношению к падающей волне) здания, значение $\Delta\bar{p}_{\text{max}}^+ = 4$ достигается при увеличении расстояния между ними до $\sim 0,8$ длины волны. При этом же значении S у основания первого здания (за ним) устанавливается наименьшее значение коэффициента отражения, равное $\Delta\bar{p}_{\text{max}}^+ \sim 1,1$. Коэффициенты отражения в точках А и Б (см. фиг. 2) одинаковы и равняются $\Delta\bar{p}_{\text{max}}^+ \sim 2,7$ при значении S , равном четверти длины волны. В реальном случае это расстояние будет соответствовать 34 м при длине волны 136 м ($t_{\pm} = 0,4$ с) и высоте зданий 42 м.

Кроме значительного увеличения коэффициентов отражения в условиях города при падении на него N -волны звукового удара в некоторых случаях (между зданиями, в сооружениях типа колодец и т. д.) имеют место значительные резонансные колебания ударной волны [11], которые, по-видимому, должны существенно увеличивать силовое воздействие на эти сооружения.

В настоящей работе были проведены измерения давления в центре основания цилиндрических „колодцев“ диаметром 26 и 12 мм (что соответствует $\sim 0,2$

Модель	α°	$\bar{\Delta p}_{\max}^+$	$\Delta p_{\max}^+ 10^2 \text{ Па}$	$t \pm 10^{-3} \text{ С}$	Схема
Экран [4]	0+70	2	3+12	0,4+0,8	
Экран [4]	70+90	2+1	$(9+12) - (1,5+6)$	0,4+0,8	
Два здания $S=(0,04+0,8) l_{\pm}$	45	2,4+4	$7,2 \pm 12$	0,4	
$S=(0,04+0,8) l_{\pm}$	45	2,8+1,1	$8,4+2,2$	0,4	
Трехгранный угол [5] $\theta=120^\circ$ $\theta=90^\circ$ $\theta=60^\circ$ $\theta=45^\circ$	45	6 7,6 12 10	18 22,8 30	0,4	
Колодец	45	3,3	9,9	0,4	
Шар $d=0,4 l_{\pm}$	45	3,9	11,7	0,4	
Полуцилиндр $R=0,17 l_{\pm}$	45	6,5	19,5		
Гиперболоид	0	12	72	0,8	
Узкий конус (рупор)	0	4	16	0,5	

и 0,1 длины волны) различной глубины, выполненных в экране, имитирующем земную поверхность. Зависимость $\Delta \bar{p}_{\max}^+$ от глубины „колодца“, выраженной в его диаметрах $\bar{h}_k = h_k/d_k$ (фиг. 3), показывает, что наибольшие коэффициенты отражения $\Delta \bar{p}_{\max}^+ \sim 3,3$ соответствуют $h_k = 1$.



Фиг. 3

В таблице приведены некоторые максимальные коэффициенты отражения, полученные при экспериментальном исследовании взаимодействия ударной N -волны слабой интенсивности с моделями наземных сооружений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Жилин Ю. Л. Звуковой удар от сверхзвукового пассажирского самолета. Труды ЦАГИ, вып. 1489, 1973.
2. Жилин Ю. Л., Лавров Ю. В. Сравнение теоретических и натурных экспериментальных данных по звуковому удару от легкого самолета. Труды ЦАГИ, вып. 1489, 1973.
3. Ferri A., Schwartz I. R. Sonic boom generation propagation and minimization. AIAA 10th Aerospace Sciences Meeting. AIAA Paper, N 72-194, 1972.
4. Голубинский А. И., Соколов К. Б., Хитрук Т. С., Окунева Л. А. Исследование отражения, дифракции и фокусировки N -волны звукового удара на моделях различных сооружений. Труды ЦАГИ, вып. 1397, 1972.
5. Яковлев Ю. С. Гидродинамика взрыва. Л., Судпромгиз, 1961.
6. Соколов К. Б. Взаимодействие N -волны звукового удара с препятствием в окрестности угловых точек. „Ученые записки ЦАГИ“, т. IV, № 5, 1973.
7. Соколов К. Б. К методике экспериментального изучения нестационарных процессов. „Ученые записки ЦАГИ“, т. IV, № 1, 1973.
8. Зайцев С. Г. Об измерении быстроменяющихся давлений в газовой среде. ПТЭ, АН СССР, 1958, № 6.
9. Роглэнд, Куллэн. Пьезоэлектрический датчик давления с акустическим стержнем. Приборы для научных исследований. М., „Мир“, 1967.
10. Глозман И. А. Пьезоэлектрические материалы в электронной технике. М.—Л., „Энергия“, 1965.
11. Peschke W. Experimental investigation of N -wave interaction with topographic models. AIAA 4th Fluid and plasma dynamics conference. AIAA Paper, N 71-619, 1971.
12. Rao B. M., Zumwalt G. W. Diffraction and reflection of sonic boom waves. J. de Mecanique, vol. 9, N 2, 1970.