

ми относительной погрешности $\Delta p' = \Delta p(t/t_c) / (p_m p_i)$ от $t' = t/t_c$ на фиг. 3, рассчитанными для сферической волны при точечном взрыве по данным [5] для $p_m = 1$; 0,5 атм (кривые 1, 2). Здесь $\Delta p(t)$ — разность значений $p_c(t)$, полученных с помощью формулы (1) и с учетом величины $q = f(t)$, приведенной в [5], p_m — скачок давления на фронте волны, t_c — длительность фазы сжатия. Этот вывод был подтвержден экспериментально при регистрации ударных волн с треугольным профилем $p(t)$ в ударной трубе [2], $p_m/p_i \leq 1,5$. Зависимость давления $p(t)$ регистрировалась торцевым датчиком, установленным заподлицо на стенке ударной трубы и сравнивалась с зависимостью $p(t)$, рассчитанной в соответствии с (1) по выходному сигналу $u(t)$ датчика, введенного в ядро потока. Для сферического датчика расхождение соответствующих значений $p(t)$ не превышало погрешности эксперимента (3–4%), в то время как вклад эффектов обтекания в показания сферического датчика достигал 20–24%.

Таким образом, если датчик объемного типа используется в условиях, когда течение газа за фронтом волны дозвуковое, $M < 1$, интегральный коэффициент давления p_i можно рассматривать как некоторый параметр собственно датчика, который однозначно определяется путем предварительной градуировки, например в ударной трубе, и характеризует вклад эффектов обтекания в выходной сигнал датчика, выраженный через величину скоростного напора. Наиболее подходит преобразователь с чувствительным элементом в виде сферы или короткого цилиндра, для которых величина $p_i = -(0,5-0,7)$ слабо зависит от направления потока. При этом избыточное давление в волне рассчитывается по формуле (1).

ЛИТЕРАТУРА

1. Дейч М. Е. Техническая газодинамика. М.: Энергия, 1974. 592 с.
2. Потапов В. М., Чикин И. И., Нецименко Ю. П. Ударная труба. А. с. № 979929. — Открытия. Изобретения. Промышл. образцы. Товар. знаки, 1982, № 45 от 7.12.82.
3. Нецименко Ю. П., Чикин И. И. Определение динамических характеристик преобразователей давления нестационарных ударных волн с помощью ударной трубы с камерой высокого давления переменной длины. — Тез. докл. 3-го Всесоюз. симп. Динамические измерения. Л., 1981, с. 84–86.
4. Броуд Г. Расчеты взрывов на ЭВМ. М.: Мир, 1976. 271 с.
5. Баум Ф. А., Станюкевич К. П., Шехтер Б. И. Физика взрыва. М.: Физматгиз, 1959. 800 с.

Москва

Поступила в редакцию
6.VII.1984

УДК 533.6.011.72:532.529

К ТЕОРИИ ГИДРОУДАРА В ДВУХФАЗНОЙ ГАЗОЖИДКОСТНОЙ СМЕСИ ПРИ СНАРЯДНОМ РЕЖИМЕ ТЕЧЕНИЯ

КОВАЛЕВ А. Д., ШИНДЯПИН Г. П.

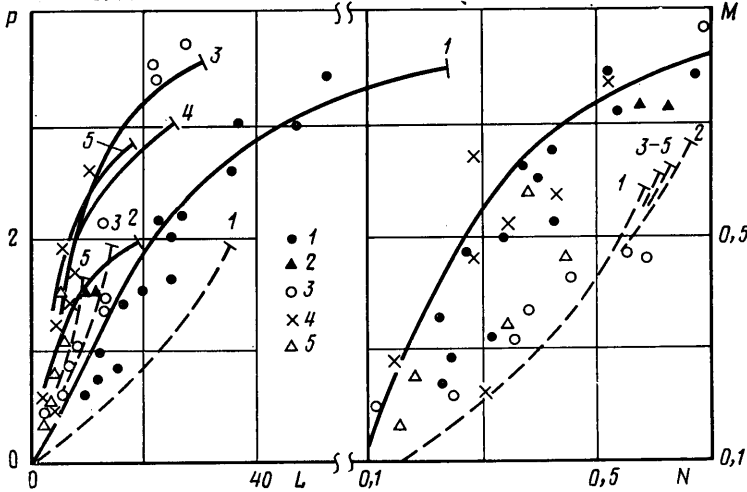
С учетом ударно-волнового характера процесса [1, 2] исследуется интенсивность гидроудара в двухфазной газожидкостной смеси при снарядном режиме течения в случае перекрытия трубопровода по жидкой пробке в зависимости от длины отсекаемой части жидкой пробки, содержания пузырьков газа в жидких пробках и закона перекрытия трубопровода. Расчетные данные по ударно-волновой теории хорошо согласуются с экспериментальными данными [3] и в отличие от результатов линейной теории [3] позволяют определить интенсивность гидроудара не только в случае слабых волн, но и в случае волн умеренной интенсивности.

1. В [3] экспериментально показано, что давление при гидроударе при снарядном режиме течения смеси в случае перекрытия трубопровода по жидкой пробке в целом значительно больше, чем в случае перекрытия по газовой пробке, когда отсекаемая часть газовой пробки ослабляет гидроудар и приводит в дальнейшем к быстро затухающим колебаниям давления.

В случае перекрытия по жидкой пробке, рассматриваемом ниже, в сечении перекрытия возникает ударная волна, которая распространяется со скоростью U по отсекаемой части l_1 жидкой пробки, движущейся со скоростью u_1 , отражается от границы раздела фаз и в виде волны разрежения со скоростью звука c_2 (относительно движущейся со скоростью u_2 среды) достигает в некоторый момент времени t_* сечения перекрытия. Если к моменту t_* прихода волны разрежения сечение не перекрыто полностью, т. е. t_* меньше времени перекрытия t_1 , то интенсивность гидро-

удара $P = (p_2 - p_1) / p_1$ (максимальное относительное избыточное давление в сечении перекрытия) не достигает своего наибольшего при данном законе перекрытия значения P_* , соответствующего случаю $t_* = t_1$.

Нестационарный процесс распространения ударной волны и отражения волны разрежения при $0 \leq t \leq t_*$, обусловленный в основном нестационарностью процесса перекрытия [4], в среднем представим как некоторый эффективный ударный переход с фиксированными параметрами за фронтом ударной волны. Скорость жидкости за ударной волной u_2 определим по заданному закону перекрытия $Q = Q(t)$, $0 \leq t \leq t_1$. $Q(0) = Q_0$, $Q(t_1) = 0$ через средний объемный расход жидкости в сечении перекрытия за время t_* . Используя соотношения на ударной волне при условии изотермичности [5] и ряд упрощающих предположений ($u_1 \ll U$, $u_2 \ll c_2$, $\psi \ll 1$), запишем соот-



ношения для определения расчетных параметров

$$\frac{p_2 - p_1}{\rho_1 u_1 U} = 1 - q(\tau), \quad \frac{l_1}{t_1} \left(\frac{1}{U} + \frac{1}{c_2} \right) = \tau$$

$$U = c_2 = c_1 \sqrt{\frac{p_2}{p_1}}, \quad c_1^2 = \frac{p_1}{\rho_1 \psi} \quad (1.1)$$

$$\frac{u_2}{u_1} = q(\tau) = \frac{1}{\tau} \int_0^\tau q'(\tau') d\tau', \quad q'(\tau') = \frac{Q(t)}{Q_0}$$

$$\tau' = \frac{t}{t_1}, \quad \tau = \frac{t_*}{t_1}$$

Здесь ψ — объемное содержание пузырьков газа в жидких пробках, которое может быть определено через среднее объемное газосодержание φ согласно [3] как $\psi = 0,15\varphi^{2,23}$; $0,002 \leq \psi \leq 0,04$; $0,15 \leq \varphi \leq 0,55$. Наличие пузырьков газа приводит к высокой сжимаемости жидких пробок и позволяет пренебречь упругими свойствами стенок трубопровода. Плотность среды в жидких пробках ρ_1 при сделанных выше допущениях практически совпадает с плотностью чистой жидкости.

Соотношения (1.1) можно представить в виде функциональной зависимости двух комплексов параметров M и N , определенных через искомую интенсивность гидроудара P , относительную длину отсекаемой части жидкой пробки L и параметры подобия Eu , ψ

$$M = P \sqrt{\frac{Eu \psi}{1 + P}} = 1 - q(N), \quad N = 2L \sqrt{\frac{\psi}{Eu(1 + P)}} = \tau \quad (1.2)$$

$$0 < \tau \leq 1, \quad P \leq P_* = 2m(\sqrt{1 + m^2} + m), \quad m = \frac{1 - q(1)}{2\sqrt{Eu \psi}}$$

$$P = \frac{p_2 - p_1}{p_1}, \quad L = \frac{l_1}{t_1 u_1}, \quad Eu = \frac{p_1}{\rho_1 u_1^2}, \quad 0 < \psi \ll 1$$

При заданном законе перекрытия соотношения (1.2) устанавливают зависимость P от L при фиксированных значениях Eu, ψ . Максимально возможное значение интенсивности P_* достигается при $\tau=1$ и зависит от закона перекрытия. В случае мгновенного перекрытия, т. е. при $q(1)=0$, значение P_* превышает аналогичные значения при других законах перекрытия.

2. На фигуре точками в плоскостях безразмерных переменных P, L и M, N представлены экспериментальные данные [3], полученные при различных значениях скорости, объемного содержания газа в жидких пробках и различных длинах отсекаемой части жидкой пробки ($u_1=2-4$ м/с; $\psi=0,0076-0,034$; $l_1=5-100$ см). Номера серий экспериментов соответствуют значениям параметров Eu, ψ : 1 - 36,3; 0,0076, 2 - 17,1; 0,034, 3 - 15,1; 0,018, 4 - 14,4; 0,023, 5 - 11,3; 0,032. На плоскости переменных M, N (1.2) экспериментальные точки различных серий группируются в окрестности некоторой кривой, зависящей от закона перекрытия. Аналитическое выражение этой кривой, позволяющее оценить значения P сверху при различных значениях L , может быть получено согласно установленной зависимости M от N (1.2) при экспоненциальной аппроксимации закона перекрытия при $n=0,15$

$$q(\tau) = \frac{n\sqrt{\pi}}{2\tau} \Phi\left(\frac{\sqrt{2}}{n}\tau\right), \quad q'(\tau) = \exp\frac{-\tau^2}{n^2} \quad (2.1)$$

Здесь Φ - интеграл вероятностей. Зависимость M от N показана на фигуре сплошной линией. Отметим, что различным сериям экспериментальных данных должны соответствовать различные законы перекрытия вследствие обратного влияния потока на закон перекрытия [6]. Приведенный закон (2.1) представляет предельный закон перекрытия, позволяющий определять максимальные значения интенсивности гидроудара P при различных газосодержаниях и длинах отсекаемой части жидкой пробки.

На фигуре в плоскости переменных P, L сплошными линиями нанесены расчетные зависимости переменных, соответствующие зависимости M от N (1.2), (2.1). Расчетные зависимости P от L хорошо согласуются при больших интенсивностях с экспериментальными данными различных серий при различных значениях Eu, ψ . Некоторое расхождение экспериментальных и расчетных данных при малых интенсивностях может быть объяснено возрастающим влиянием эффектов нестационарности при уменьшении длины отсекаемой части жидкой пробки.

На фигуре в плоскости переменных P, L и M, N штриховыми линиями нанесены данные расчета по линейной теории [3]. Сравнение расчетных зависимостей и экспериментальных данных показывает, что результаты ударно-волновой теории (1.2) значительно полнее описывают зависимость интенсивности гидроудара P от относительной длины отсекаемой части жидкой пробки L во всем диапазоне длин при различных значениях параметров подобия Eu, ψ и позволяют в отличие от линейной теории рассчитать максимальное значение интенсивности гидроудара P_* .

ЛИТЕРАТУРА

1. Гельфанд Б. Е., Тимофеев Е. И. Исследование гидроудара в гидродинамических ударных трубах. - Теплофиз. высоких температур, 1983, т. 21, № 2, с. 330-334.
2. Ковалев А. Д., Шиндяпин Г. П. К теории гидроудара в двухфазной газожидкостной смеси. - Изв. АН СССР. МЖГ, 1984, № 5, с. 202-204.
3. Akagawa Koji, Fujii Terushige, Ito Yutaka, Yamaguchi Toshiaki, Fukuhara Kazuya. Studies on shock phenomena in two-phase flow. - Bull. JSME, 1982, v. 25, № 201, p. 387-394.
4. Филлин Н. В., Кацнельсон Г. Г., Захаров В. Н., Иовнович Я. Л. Особенности регулирования динамики работы запорной арматуры с пневматическим приводом. - Хим. и нефть. машиностроение, 1981, № 4, с. 12-13.
5. Campbell I. J., Pitcher A. S. Shock waves in a liquid containing gas-bubbles. - Proc. Roy. Soc., Ser. A., 1958, v. 243, № 1235, p. 534-545.
6. Иовнович Я. Л., Захаров В. Н., Кацнельсон Г. Г., Филлин Н. В. Моделирование неустановившихся течений, взаимодействующих с пневмоприводом. - Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт, 1980, № 6, с. 151-156.

Саратов

Поступила в редакцию
17.VII.1984