8. **С. С. Горелик, Л. Н. Расторгуев, Ю. А. Скаков.** Рентгенографический и электронно-оптический анализ. М.: Металлургия, 1970.
9. **О. Н. Бреусов, В. Ф. Таций.** ЖНХ, 1975, 20, 4, 860.
10. **Физическая** акустика/Под ред. У. Мэзон. Т. IV, ч. Б. М.: Мир, 1970.

Поступила в редакцию 31/III 1986

ОПТИМИЗАЦИЯ МЕТАНИЯ СИСТЕМОЙ ДВУХ ГАЗОВ

Э. И. Андрианкин, Р. Н. Воробьев, А. Л. Глебов
(Москва)

При метании расширяющимся идеальным газом верхней оценкой для конечной кинетической энергии поршня является работа, совершаемая газом при квазистатическом адиабатическом расширении:

$$A = \frac{Mp_0v_0}{\gamma-1}\left[1-\left(\frac{Mv_0}{V}\right)^{\gamma-1}\right], \qquad (1)$$

где M — масса газа; p_0, v_0 — начальные давление и удельный объем; γ — показатель адиабаты; V — полный объем цилиндрической трубы, в которой ускоряется поршень. Для оптимального значения массы газа эта работа не зависит от v_0:

$$A_m = \gamma^{-\frac{\gamma}{\gamma-1}}p_0V. \qquad (2)$$

Если скорость поршня больше скорости звука в газе, то реальная кинетическая энергия поршня значительно меньше A_m, так как в равновесном расширяющемся газе давление не успевает выравниваться. Можно, однако, существенно увеличить энергию поршня и приблизить ее к A_m, используя вместо одного газа гетерогенную систему двух газов, если в качестве второго взять более легкий газ (с меньшей молекулярной массой). Даже в том случае, когда начальное давление во втором газе намного меньше, чем в первом (а значит, метание с помощью только этого газа менее эффективно), добавление второго газа к первому ускоряет выравнивание давления в системе (скорость звука в более легком газе больше) и повышает скорость метания.

В настоящей работе справедливость этих положений подтверждена результатами численного решения модельной задачи о метании системой двух газов, а также решена задача оптимизации этой системы.

Начальная конфигурация системы дана на рис. 1. Задача расчета одномерного течения невязкого нетеплопроводного газа решалась численно методом Годунова [1]. На рис. 2 показана зависимость конечной скорости поршня от $\beta = M_2/M_1$ для двух значений величины $\alpha = m/(M_1+M_2)$, где m — масса поршня. При расчете использовались следующие параметры системы: начальные давления $p_1 = 0{,}5$ ГПа, $p_2 = 0{,}23$ ГПа, показатель адиабаты обоих газов $\gamma = 1{,}2$, начальные скорости звука $c_1 = 1040$, $c_2 = 1640$ м/с, $m = 0{,}003$ кг, полная длина трубы $l = 6$ м, диаметр трубы $d = 0{,}008$ м. Кривые *1*, *2* соответствуют системе, показанной на рис. 1. Для сравнения кривыми *3*, *4* приведены аналогичные зависимости для системы, получающейся, если газы 1 и 2 поменять местами. Из рис. 2 видно, что в первом случае скорость метания значительно повышается с ростом доли легкого газа, а во втором изменение u невелико.

Интересно найти оптимальные параметры двухгазовой системы, обеспечиваю-

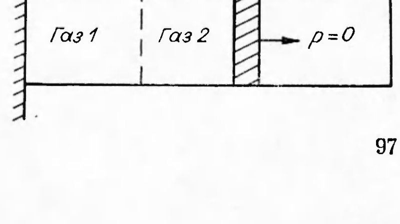

Рис. 1. Начальная конфигурация системы.

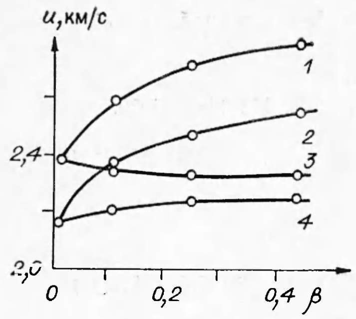

Рис. 2. Зависимость $u(\beta)$.
1, 3 — $\alpha=0{,}4$; *2, 4* — $\alpha=0{,}6$.

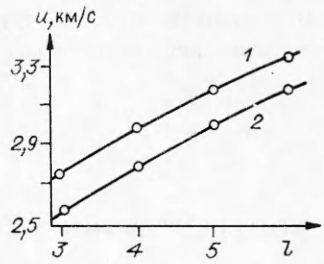

Рис. 3. Зависимость $u_{\max}(l)$ при разных p_2.

щие наиболее эффективное метание. Решение задачи расчета течения, выраженное в безразмерных единицах, полностью определяется следующими параметрами: p_2/p_1, c_2/c_1, γ_1, γ_2, α, β, $(p_1ld^2)/(mc_1^2)$. Если задаться типичными отношениями параметров тяжелого и легкого газов, то при фиксированной длине трубы (последний параметр) можно проводить оптимизацию по α и β. Поставлена задача нахождения максимума конечной скорости поршня $u_{\max}$ как функции величин α и β (остальные параметры системы фиксированы). Конкретно $u(\alpha, \beta)$ каждый раз определяли численным расчетом течения газов. Полученная задача математического программирования решалась методом Хука — Дживса [2], модифицированным с учетом ограничений, заключающихся в указании интервалов допустимых значений для α и β ($\alpha = 0{,}04 \div 1{,}2$, $\beta = 0{,}1 \div 10$) [3]. Найденные точки максимума во всех случаях находились вдали от границ допустимой области.

Для $p_2 = 0{,}3$ ГПа (c_2 и остальные параметры те же, что и прежде) зависимость $u_{\max}(l)$ показана на рис. 3, *2*. Соответствующее оптимальное значение параметра α монотонно уменьшается от $\alpha = 0{,}27$ при $l = 3$ м до $\alpha = 0{,}15$ при $l = 6$ м. Оптимальное значение β во всех случаях находилось в интервале 0,35—0,4. Рис. 3, *1* соответствует $p_2 = 0{,}5$ ГПа (при том же значении c_2). Видно, что метание двухгазовой системой более эффективно даже тогда, когда $p_2 = p_1$ (и, следовательно, метание одним легким газом более эффективно, чем одним тяжелым). Оптимальные значения параметров в этом случае таковы: $\alpha \approx 0{,}2$ (при всех l); β монотонно меняется от 0,5 ($l = 3$ м) до 1,1 ($l = 6$ м).

В заключение отметим, что найденные точки максимума практически не зависят от начального приближения, поэтому можно предположить, что эти максимумы не только локальны, но и глобальны.

ЛИТЕРАТУРА

1. **С. К. Годунов, А. В. Забродин, М. Я. Иванов, А. И. Крайко и др.** Численное решение многомерных задач газовой динамики. М.: Наука, 1976.
2. **R. Hooke, T. A. Jeeves.** J. Assoc. Comput. Mach., 1961, 8, 212.
3. **Э. И. Андрианкин, А. Л. Глебов.** ПМТФ, 1986, 2.

Поступила в редакцию 7/III 1986,
после доработки — 23/VI 1986