

6. Иванов Ф. И., Лукин М. А., Зуев Л. Б. и др. Материалы I Всесоюз. симп. по макроскопической кинетике и химической газодинамике. Т. 2.—Алма-Ата, 1984.
7. Сухушин Ю. И., Иванов Ф. И., Захаров Ю. А.— В кн.: Физика диэлектриков и перспективы ее развития.—Л., 1973.
8. Иванов Ф. И., Зуев Л. Б., Урбан И. А. и др. Изв. СО АН СССР. Сер. хим., 1983, 5, 62.
9. Иванов Ф. И., Зуев Л. Б., Лукин М. А. и др. Кристаллография, 1983, 28, 1, 194.
10. Mark P., Gord T. J. Solid State Chem., 1975, 15, 79.
11. Захаров Ю. А., Иванов Ф. И., Сухушин Ю. И.— В кн.: Кинетика и механизм химических реакций в твердом теле.— Минск, 1975.
12. Шувалов Л. А., Урусовская А. А., Желудев И. Г. и др. Современная кристаллография. Т. 4. 1981.

Поступила в редакцию 30/IX 1986

К МЕХАНИЗМУ ВЗРЫВОВ В ГАЗОПЕРЕКАЧИВАЮЩИХ АГРЕГАТАХ МАГИСТРАЛЬНЫХ ГАЗОПРОВОДОВ

*Б. Е. Гельфанд, С. М. Фролов, С. А. Цыганов
(Москва)*

Эффективная и надежная эксплуатация газотурбинных газоперекачивающих агрегатов (ГПА) магистральных газопроводов связана с вопросами пожаро- и взрывобезопасности рабочего процесса компрессоров и нагнетателей. Возгорания и пожары в нагнетателе, кроме перегрева деталей тракта, могут вызвать неустойчивую работу с автоколебаниями давления и расхода рабочего тела. Сопровождающие этот процесс помпажные удары и интенсивные волны давления могут привести к обрывам лопаток, разрывам дисков и т. д.

Экспериментальное исследование последствий загораний, пожаров и взрывов в ГПА трудоемко и сопряжено с большими затратами. В связи с этим большое значение приобретают вопросы моделирования газопроводных систем и исследования процессов, возникающих при установившихся и переходных режимах эксплуатации ГПА, для прогнозирования аварийных ситуаций. В настоящее время теоретическое исследование процессов в ГПА возможно лишь в приближенной постановке задачи. Как правило, ступени компрессоров или нагнетателей замещаются эквивалентными активными дисками, моделирующими устойчивую и неустойчивую работу агрегата и передающими воздействие лопаточных венцов на поток [1]. В [2] предложена квазиодномерная модель для анализа закономерностей распространения сильных возмущений давления в тракте силовой установки в приближении вязкого потока. Приведение системы уравнений задачи к упрощенным одномерным уравнениям движения идеального сжимаемого газа в [3] не привело к значительным качественным отклонениям расчетных динамических реакций компрессора от экспериментально измеренных.

Исследование проблемы пожаро- и взрывобезопасности рабочего процесса в нагнетателе ГПА предполагает включение в модель дополнительных уравнений, описывающих протекание химических реакций в тракте. Ситуация, когда в рабочем объеме возникают условия для протекания химических реакций, возможна при подсосе воздуха в приемную линию ГПА. Температура за последней ступенью нагнетателя может оказаться достаточной для самовоспламенения смеси. Кроме того, если состав газовой смеси находится во взрывных пределах, то может произойти возгорание смеси от горячих поверхностей в тракте нагнетателя, например, подшипника ротора, разогревающегося от недостатка смазки, и т. д.

Рассмотрим задачу о движении газовой смеси через многоступенчатый осевой нагнетатель. Ступени имеют одинаковую характе-

ристку (степень сжатия π) и замещаются эквивалентными активными дисками. Поток в канале нагнетателя, всасывающем и нагнетательном трубопроводах принимается одномерным, сжатие смеси в ступени — изоэнтропическим. Безразмерные уравнения газодинамики и химической кинетики, описывающие нестационарное течение идеальной сжимаемой газовой смеси в системе всасывающий трубопровод — нагнетатель — нагнетательный трубопровод, имеют вид

$$\frac{\partial g}{\partial \tau} + \frac{\partial F}{\partial x} = B, \quad (1)$$

$$g = \begin{bmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho a \\ 0,5\gamma\rho u^2 + \rho(e + a^n\alpha) \end{bmatrix}, \quad F = \begin{bmatrix} \rho u \\ (p + \rho u^2)/\gamma \\ \rho u a \\ \rho u + 0,5\gamma\rho u^3 + \rho u(e + a^n\alpha) \end{bmatrix},$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ \varphi \\ -\rho a^n \exp[\beta(1 - \Theta^{-1})] \\ \psi \end{bmatrix}.$$

Здесь $p, \rho, u, e, a, x, \tau$ — безразмерные давление, плотность, скорость, внутренняя энергия единицы массы смеси, относительная массовая концентрация исходной смеси, координата и время, определяемые из условий:

$$p = PP_0^{-1}, \quad \rho = PT_0(P_0T)^{-1}, \quad u = U(\gamma RT_0)^{-1/2},$$

$$e = p/\rho(\gamma - 1), \quad \alpha = Q(RT_0)^{-1}, \quad x = Xk \exp(-E/RT_0)/\sqrt{\gamma RT_0},$$

$$\tau = tk \exp(-E/RT_0), \quad \beta = E/RT_0.$$

Величины P, T, U, X, t, E и Q — размерные давление, температура, скорость, координата, время, энергия активации и теплота сгорания; R — газовая постоянная; n — порядок реакции; γ — показатель адиабаты; k — предэкспонент; индекс нуль соответствует параметрам в нагнетательном трубопроводе.

На активных дисках при стационарном течении

$$\rho_i^s = \pi^{-i/\gamma}, \quad p_i^s = \pi^{-i}, \quad \Theta_i^s = \pi^{-i(\gamma-1)/\gamma}, \quad u_i^s = u_0^s \pi^{i/\gamma}, \quad (2)$$

где $\Theta = p/\rho$ — безразмерная температура; индекс $i = 0, \dots, N-1$ соответствует параметрам за последней, ..., за первой ступенями нагнетателя; s относится к величинам в стационарном режиме. На расчетном режиме работы степень сжатия ступени связана с массовым расходом через характеристику ступени $\pi = \pi(\rho u, \omega)$, где ω — частота вращения ротора лопаточной машины. При теоретическом анализе нестационарных течений в компрессорах и нагнетателях полагают, что в нестационарном потоке сохраняются неизменными стационарные характеристики ступеней [4] или вводят понятие динамической задержки реакции ступени [5]. Для простоты считаем, что нагнетатель работает от привода, обеспечивающего постоянство числа оборотов ротора, а характеристики ступеней удовлетворяют условию $\pi(\rho u) = \text{const}$.

В областях, не занятых лопаточными венцами, $\varphi = \psi = 0$, на активных дисках φ и ψ отличны от нуля и определяются из стационарных уравнений сохранения импульса и энергии

$$\varphi = \frac{\gamma^{-1} d(\rho u^2 + p)}{dx},$$

$$\psi = \frac{d(\rho u + 0,5\gamma\rho u^3 + \rho u e)}{dx}. \quad (3)$$

Система уравнений (1)–(3) дополняется начальными и граничными условиями. В момент времени $\tau = 0$ термодинамические параметры и скорости равны стационарным значениям (2), а концентрация горючей смеси на входе в нагнетатель $a = a_0$. Рассмотрим процессы, развивающиеся за времена, малые по сравнению с временем прихода возмущений от границ рассчитываемого интервала. В этом случае допустимо приближенное задание условий на границах, но возникает необходимость непрерывного контроля ошибки вычислений. Переменные на левой условной границе поддерживаются постоянными и равными стационарным значениям $Y_0^{m+1} = Y_0^m$. На правой условной границе переменные рассчитываются как $Y_J^{m+1} = Y_{J-1}^{m+1}$. Здесь Y — переменная; 0 и J — номера граничных узлов сетки; m — момент времени.

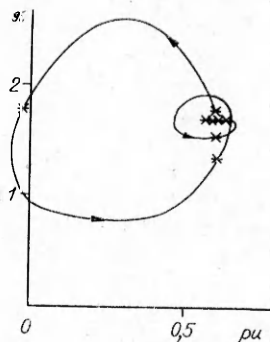
Для численного решения системы (1)–(3) совместно с начальными и граничными условиями использовалась двухшаговая схема Лакса — Вендроффа [6]. Для сглаживания нефизических осцилляций решения применялся метод [7]. Предварительно проводились отладочные расчеты распространения инертной примеси в тракте нагнетателя, распада произвольного разрыва и возникновения детонации в реакционной смеси при линейном начальном распределении температуры [8]. При анализе течения в модельном четырехступенчатом осевом нагнетателе полагалось, что расстояние между активными дисками $L = 0,1$ м, а химическая реакция в газовой смеси описывается уравнением первого порядка при $k = 10^{12} \text{ с}^{-1}$, $E/R = 13\,000$ К. В расчетах варьировался коэффициент избытка воздуха a_0 во входном сечении нагнетателя.

При фиксированном a_0 расчет проводился до появления в тракте отрицательной скорости. Этот момент интерпретировался как начало неустойчивой работы агрегата. Анализировались случаи $a_0 = 0,2; 0,4; 0,8; 1,0$. На рисунке показана траектория рабочей точки на характеристике последней ступени нагнетателя при $a_0 = 0,2$; * — положения рабочей точки через 50 мкс.

Самовоспламенение газовой смеси наблюдалось на некотором расстоянии от венца последней ступени, зависящем от a_0 . Протекание химической реакции приводило к локальному повышению p и T за последней ступенью нагнетателя. Скорость нарастания давления зависела от a_0 и служила основным фактором, определяющим возбуждение неустойчивой работы агрегата. При быстром протекании реакции за последней ступенью генерировалась ударная волна (УВ), которая разогревала свежую смесь и инициировала в ней химическую реакцию.

Механизм возникновения и усиления УВ в газовом потоке во многом подобен механизму [8, 9]. Согласно [9], протекание химической реакции в объеме с неравномерным распределением температуры приводит к неравномерному расширению газа и, как следствие, к появлению ударных и детонационных волн. В рассматриваемом случае возможность возникновения интенсивных УВ обусловлена наличием градиента времени пребывания реакционной смеси за последней ступенью нагнетателя. В результате роста давления за последней ступенью увеличивался коэффициент π и уменьшался расход газа ρu . Появление кратковременного обратного тока в нагнетателе (см. рисунок) обусловлено УВ, распространяющейся против течения.

Проведенные расчеты показывают, что проникновение воздуха в магистраль газопровода может привести к опасным последствиям. Генерируемые при возгорании газовой смеси УВ могут разрушить элементы ГПА, вывести из строя оборудование и вызвать лавинное разрушение труб газопровода. Отметим, что в рассмотренной модели изучалось самовоспламенение реакционной смеси при рабочей температуре за последней ступенью нагнетателя. Самостоятель-



ный интерес представляет случай, когда газоздушная смесь воспламеняется от горячего очага (например, подшипника ротора). Тогда теория должна учитывать взрывные концентрационные пределы.

ЛИТЕРАТУРА

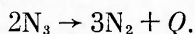
1. Kuhlberg I. F. AIAA Paper, N 69—486, 1969.
2. Haloulakos V. E. Ibid., N 81—1475, 1981.
3. Peacock R. E., Eralp O. C., Das D. K. Ibid., N 80—1080, 1980.
4. Скворцов Ю. А. Учен. зап. ЦАГИ, 1982, XIII, 1, 21.
5. Sugiyama Y., Hamed A., Tabakoff W. AIAA Paper, N 78—246, 1978.
6. Рихтмайер Р., Мортон К. Разностные методы решения краевых задач.— М.: Мир, 1972.
7. Зелинский Н. И., Сапожников В. А.— В кн.: Численные методы механики сплошной среды. Т. 14, № 3.— Новосибирск, 1983.
8. Гельфанд Б. Е., Поленов А. П., Фролов С. М. и др. ФГВ, 1985, 21, 4, 118.
9. Зельдович Я. Б., Либрович В. В., Махвиладзе Г. М. и др. ПМТФ, 1970, 2, 76.

Поступила в редакцию 26/V 1986

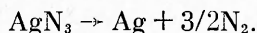
ВЗРЫВНОЕ РАЗЛОЖЕНИЕ АЗИДА СЕРЕБРА

Ю. Ю. Сидорин, С. И. Куракин, В. Г. Додонов
(Кемерово)

Заметное место в химии твердого тела занимают исследования экзотермических превращений, протекающих в твердых неорганических системах под действием тепла, света, ионизирующего излучения. Такие реакции в зависимости от интенсивности воздействия и других факторов могут протекать, например, в азидов металлов с характерными временами от 10^{-6} (взрыв) до 10^7 с и более (медленное разложение) [1]. Типичный представитель таких соединений — азид серебра. Во всех случаях реакция твердофазного превращения в AgN_3 протекает с выделением значительной энергии (74 ккал/моль), образующейся в основном за счет взаимодействия двух азид-радикалов:



Такое разложение структуры, вызванное действием инициаторов, происходит по схеме



В выполненных в данной работе исследованиях использовались поликристаллические препараты, синтезированные из обменной реакции между водными растворами нитрата серебра и азидов натрия [2]. Медленное разложение осуществлялось термически и радиационно, а взрывное инициировалось термически и излучением лазера. Во всех случаях эксперименты проводили в специальных камерах, позволяющих иметь различные газовые атмосферы или жидкие среды из органических веществ.

Исследования показали, что твердофазное разложение азидов серебра является источником получения дисперсного металла, обладающего рядом весьма интересных и необычных свойств. При этом выясняется, что в режиме взрывного разложения AgN_3 выделенная энергия частично передается образующимся атомам (кластерам) серебра, которые, приобретая вследствие этого высокие температуры и кинетическую энергию, обладают весьма необычными реакционными свойствами. Последние проявляются в виде нетривиальных химических реакций частиц серебра с компонентами газовой атмосферы, а также при внедрении их в массивные вещества с образованием интерметаллов или силицидов. По сути, речь идет о новом исследовательском классе твердофазных процессов, в котором один из реагентов находится в уникальном состоянии (высо-