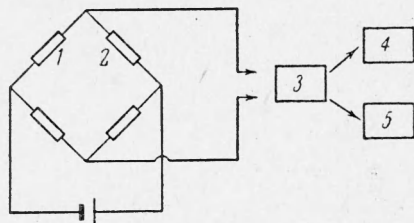


ИЗМЕРЕНИЕ ДАВЛЕНИЯ ВЫСОКОДАВЛЯЮЩИХ ИМПУЛЬСНЫХ СТРУЙ МЕТОДОМ ТЕНЗОМЕТРИИ

В. П. Бородин, Б. В. Войцеховский, В. В. Михайлов
(Новосибирск)

Описан датчик, выполненный в виде трубки Пито с цилиндрическим тензометром, при помощи которого можно измерять динамические давления порядка десятков тысяч атмосфер. Датчик прост в изготовлении, надежен в работе и практически безынерционен. Обнаружено явление «самоотсекания» струи, представляющее собой автоколебательный процесс.

В поставленной авторами задаче требовалось измерить динамическое давление струи водомета ИВ-4. Первоначальные расчеты показали, что главной особенностью импульсной струи является не только ее высокое полное давление, но и сильное изменение его по времени (резкий выброс до максимального значения 3—4 тыс. атм с последующим спадом и довольно длительным пологим участком). Такой характер импульсной струи накладывал на датчик следующие требования: высокая прочность, максимально высокая частота собственных колебаний, линейная характеристика в большом диапазоне частот (что обеспечивало бы надежную работу в статическом и динамическом режимах), высокая стабильность и простота.



Фиг. 1

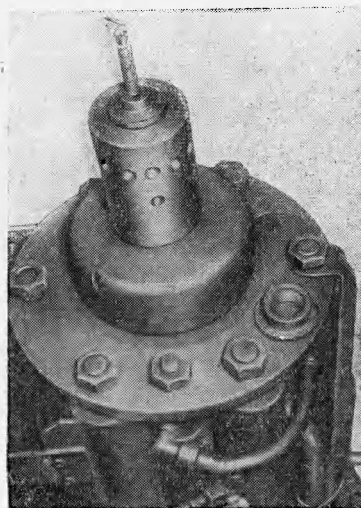
Для выполнения задачи был выбран тензометрический метод. Кроме тензометрического способа к настоящему времени хорошо разработаны и успешно применяются

следующие методы измерения давления (и соответствующие им датчики): емкостной, индуктивный магнитострикционный, пьезоэлектрический, манганиновый и др. Общие принципы измерения давления, устройства датчиков, используемые при этом радиоизмерительные схемы и приборы хорошо описаны в работах [1-4]. Библиографический список большинства иностранных работ в этой области указан в сборниках [5⁶]. Однако приведенные выше методы обладают целым рядом недостатков.

Емкостные датчики очень чувствительны к паразитным емкостям, к влиянию посторонних электрических полей. Их чувствительность сильно снижается из-за емкости подводящих проводов. Индуктивные датчики хороши, как правило, только для измерения медленно меняющихся процессов, для них характерна нестабильность частотной характеристики. Кроме того, емкостные и индуктивные датчики неудобны из-за нелинейности их амплитудных характеристик. На магнитострикционный датчик сильное влияние оказывают изменения в температуре, близко расположенные ферромагнитные массы и предварительная работа. Пьезодатчики не выдерживают больших нагрузок, а также не пригодны для измерения медленно меняющихся процессов. У манганиновых датчиков пьезокоэффициент очень невелик и, кроме того, нестабилен.

Для измерений был выбран тензометрический метод с применением проволоочного тензометра. В отечественной и иностранной литературе описано много способов применения тензодатчиков для измерения давления, но все они, как правило, применялись для измерения небольших (относительно данного случая) динамических давлений, либо для измерения больших, но статических или слабо меняющихся давлений.

Применение тензоров для измерения статических давлений порядка 700—3000 атм описано в работах [7,8]. В работах [9,12]¹ описаны датчики для измерения динамического

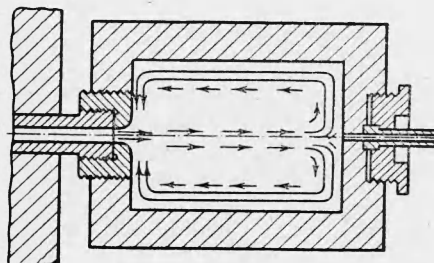


Фиг. 2

¹ Б. Л. Упадышев, Б. Д. Нессонов, Е. Ф. Желтиков, А. П. Коротков. Измеритель давления с тензометром сопротивления. Бюл. изобретений. Авторское свидетельство № 106163, 1957, № 4, стр. 43.

давления, построенные по принципу мембраны с наклеенным тензодатчиком. Эти датчики рассчитаны на давление 1—6 тыс. атм, однако их собственная частота недостаточна для измерения давления струи. В работе [12] описан датчик динамического давления, представляющий собой цилиндр с наклеенными тензодатчиками, рассчитанный на давление 3500 атм. Оценка его собственной частоты делается по приведенным величинам массы и коэффициента жесткости. Однако экспериментальных данных в работе не приводится. Наконец, в известной авторам литературе не встречалось описания работ по измерению давления струй с напорами порядка тысяч атмосфер.

В настоящей работе датчик был выполнен в виде полого стального цилиндра (сталь 30ХГСА), поверх которого наклеивалась нихромовая проволока диаметром 0,1 мм сопротивлением в 200 ом. Намотка проволоки на датчик бифилярная. Внутренний диаметр датчика 7,5 мм, внешний — 15 мм, длина — 150 мм. В отличие от других датчиков он потреблял большую мощность, что позволило питать мост схемы напряжением 20—24 в (питание обычных тензодатчиков осуществляется напряжением 6—12 в), что привело, фактически, к увеличению чувствительности. Использовался усилитель УИПП-2, выход которого подавался на два осциллографа ОК-17 и ЭО-58, что позволяло вести запись процесса с разными развертками одновременно. Электрическая схема измерения показана на фиг. 1, где 1 — датчик, 2 — эквивалент, 3 — усилитель, 4 и 5 — осциллограф.

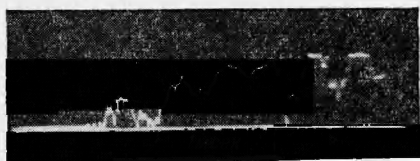


Фиг.

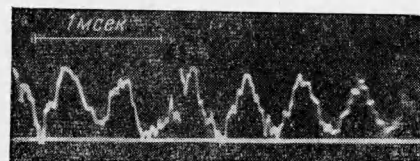


Фиг. 4

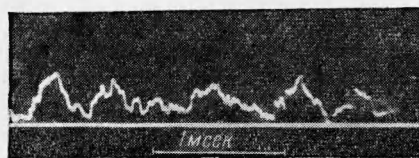
получило название «самоотсекания» струи. Переходный цилиндр представлял собой вначале замкнутый объем, ограниченный сплошными стенками. Это привело к тому, что вода, растекаясь по стенкам цилиндра, сходилась снова у выхода из сопла и задерживала струю, после чего процесс повторялся. Схема самоотсекания дана на фиг. 3. На фиг. 4 показан весь импульс, снятый осциллографом ЭО-58. На фиг. 5а, б, в показаны начало, середина и конец импульса при самоотсекании (осциллограф ОК-17). Период отсекания струи составляет около 470 мксек. Оценка этого периода по скорости струи дает вполне сходную величину около 500 мксек.



Фиг. 5а



Фиг. 5б



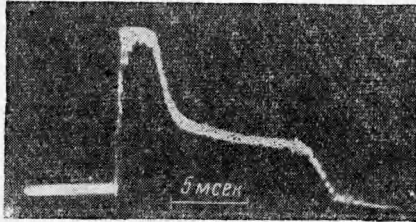
Фиг. 5в

Явление самоотсекания было устранено путем выброса воды через отверстия, просверленные по всей окружности задней стенки. Из следующих опытов (фиг. 6) видно, что этот эффект был устранен. Сигнал от головы импульса искажен за счет нелинейности амплитудной характеристики усилителя при большом усилении. Однако пологий участок импульса находится еще в линейной области, что важно для тарировки датчика. Неискаженный импульс, полученный при меньшем усилении, показан на фиг. 7.

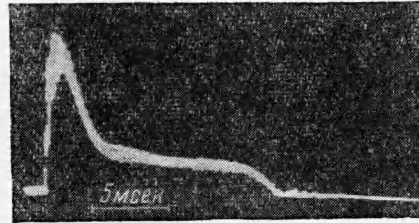
Особенности импульсной струи водомета позволили избежать специальной тарировки датчика и, таким образом, не прибегать к тарировочным установкам, описан-

ным, например, в работах [5,13]. Давление в конце импульсной струи достаточно точно определялось по известной величине давления воздуха в ресивере водомета. Тарировка сводилась к сопоставлению осциллограмм давления струи при различных давлениях воздуха в ресивере водомета.

Тарировку датчика можно также проводить путем статического нагружения датчика, подавая при этом импульс от разбалансированного моста на осциллограф путем

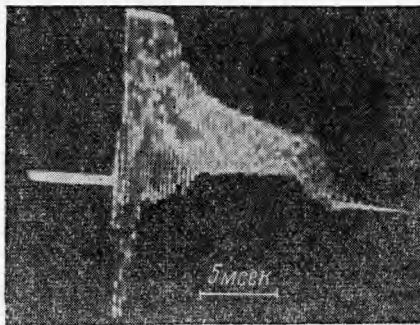


Фиг. 6



Фиг. 7

размыкания контактов между измерительным мостом и его источником питания, что соответствует мгновенному нагружению датчика. Такая тарировка не дает возможности судить о динамических свойствах датчика, но позволяет выяснить максимально возможные искажения, вносимые всей электрической схемой в результаты испытаний.

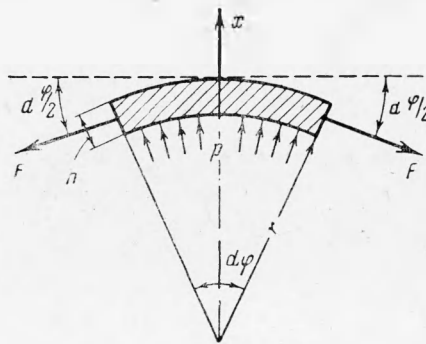


Фиг. 8

Описанный датчик применялся для измерений давлений в струях до 3100 атм. При измерениях перед началом каждого опыта датчик заливался маслом. Если датчик не был заполнен, на импульс давления накладывались колебания с частотой порядка 2300 гц. Пример таких колебаний дан на фиг. 8. Оценка частот собственных радиальных и продольных колебаний датчика показывает, что наблюдаемая частота значительно меньше их. Изгибные же колебания датчика вообще не фиксируются, так как намотка проволоки на датчик цилиндрическая. Частота собственных продольных колебаний этого датчика порядка 9000 гц. Частоту собственных радиальных колебаний датчика можно примерно оценить, исходя из рассмотрения тонкостенного датчика (фиг. 9).

Период собственных радиальных колебаний тонкостенного цилиндра равен

$$T = 2\pi \sqrt{m/c}$$



Фиг. 9

Введем обозначения: ρ — плотность материала датчика, F — усилие, x — деформация, ϵ_r — относительная деформация в тангенциальном направлении, σ_r — тангенциальное напряжение, E — модуль Юнга, p — давление внутри цилиндра, h — толщина стенок цилиндра, r — радиус цилиндра. При этом усилие на элемент массы $m = \rho h r d \varphi$ будет равно $F = p r d \varphi$. Перемещения элемента m по радиусу

$$x = \epsilon_r r = \frac{\sigma_r}{E} r = \frac{r}{E} p \frac{r}{n}$$

Для жесткости c получаем

$$c = \frac{F}{x} = \frac{E h d \varphi}{r}$$

Период собственных радиальных колебаний оказывается равным времени обегания звуковой волны по окружности.

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{c}} = 2\pi \sqrt{\frac{\rho r^2}{E}} = \frac{2\pi r}{\sqrt{E/\rho}}$$

Для используемого датчика по такой оценке частота собственных радиальных колебаний будет 108 кгц.

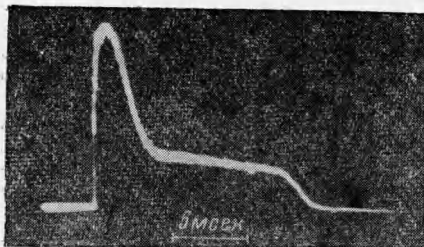
Зафиксированные колебания, очевидно, связаны с воздухом, находящимся в датчике. При заполнении датчика маслом, воском, либо при просверливании на его конце отверстия для выпуска воздуха эти колебания исчезали. Удовлетворительного объяснения этим колебаниям дать не удалось. Была сделана оценка частоты этих колебаний для системы: воздух, адиабатически сжатый в конце датчика (жесткость), и столб воды в датчике (масса). Однако для $\gamma = c_p / c_v = 1.4$ частота колебаний такой системы порядка 10 кгц, а для меньших γ (для ударного сжатия) эта частота будет еще больше.

Для измерения поля давления в струе был изготовлен датчик, размеры которого в три раза меньше первого (фиг. 10). Осциллограмма давления струи, снятая этим датчиком, показана на фиг. 11. Этот датчик представлял собой трубку Пито, заканчивающуюся цилиндрическим тензометром. Собственная частота радиальных колебаний этого датчика по оценке для тонкостенного цилиндра равна 325 кгц. В дне датчика было просверлено отверстие, что, во-первых, исключило возможность возникновения описанных выше колебаний, а во-вторых, резко повысило предел измеряемых давлений.

Датчик с выпуском воды нагружается изнутри статическим давлением протекающей через него жидкости. Это давление, измеряемое датчиком, составляет часть полного давления струи, набегающей на датчик. После соответствующей тарировки таким датчиком можно измерять давления, значительно превышающие предельное давление для датчика без выпуска воды.



Фиг. 10



Фиг. 11

Пусть внутренний диаметр датчика плавно уменьшается от d_1 до d_2 , где d_1 — внутренний диаметр датчика на входе, d_2 — внутренний диаметр на выходе. Тогда, считая жидкость идеальной, можно записать для сечения 1

$$p_1 = p_1^0 + \frac{1}{2} \rho v_1^2$$

где p_1 — полное давление, p_1^0 — статическое давление, ρ — плотность жидкости, v — скорость. Индексы 1 и 2 соответствуют указанным сечениям

$$p_1 = p_2 \approx \frac{1}{2} \rho v_2^2$$

Используя уравнение неразрывности $v_1 S_1 = v_2 S_2$, где S_1 и S_2 — внутренние сечения датчика, можно выразить полное давление через статическое давление в датчике и отношение диаметров

$$p_1 = p_1^0 = \frac{1}{1 - d_2^4 / d_1^4}$$

Увеличивая отношение d_2 / d_1 , можно значительно увеличить верхний предел измеряемых давлений. Например, описанный датчик (входной диаметр 2.5 мм), рассчитанный при $d_2 = 0$ на предельное давление в 4 тыс. атм, может измерять при $d_2 = 2.36$ мм давление до 20 тыс. атм.

Таким образом, тензометрическим методом можно успешно измерять очень высокие динамические давления. Описанный цилиндрический датчик прост в изготовлении, надежно работает и практически безынерционен.

Поступила 7 VIII 1963

ЛИТЕРАТУРА

1. Темников Ф. Е., Харченко Р. Р. Электрические измерения неэлектрических величин. Госэнергоиздат, М.—Л., 1948.
2. Турчин А. М. Электрические измерения неэлектрических величин. Госэнергоиздат, М.—Л., 1959.
3. Флиер П. А. Электрические измерения механических величин. (Пер. с нем. под ред. проф. Л. С. Фреймана), Машгиз, 1948.

4. Ж о х о в с к и й М. К. Техника измерения давления и разрежения. Изд. 2-е, Машгиз, 1952.
5. E s k e n r o d e R. T. and K i r s h n e r H. A. Measurement of pressure transients. Rev. Sci. Instrum., 1954, 25, 33—40.
6. Bibliography and Index on Dynamic Pressure Measurement. NBS. Circular No. 558, 1955, Department of commerce, National Bureau of Standards, Washington.
7. Л е о н и д о в а Г. Г., П о л а н д о в И. Н. Измерение высоких давлений с помощью проволочных преобразователей. Приборы и техника эксперимента, 1960, № 2, стр. 159.
8. Р о й т м а н Л. М. Тензومانометры. Измерительная техника, 1957, № 5, стр. 22—24.
9. M a t h e w s o n C. E. The «dimensionless» strain gage transducer. Instrument and control systems, 1961, 34, N. 10, Part 1, 1870—1871.
10. З е л я е в А. Ф., Ш у м к о в К. М., А л е к с е е в Е. Н. Диафрагменный тензометрический манометр. Завод. лаборатория, 1956, т. 22, № 11, стр. 1368—1369.
11. E d w a r d s P. L. High-speed high-pressure gage. Instrument and Automation, 1957, vol. 30, No. 8, p. 1504—1506.
12. K a u t s c h Rudi. Elektrische Druckung Hochdruckmessung mit Demungsmessstreifen. Z. Messen, Steuern, Regeln, 1961, 4, No. 5, p. 205—207.
13. Л л о й д Е. К., Д ж о н с о н Д. П. Статическая и динамическая калибровка приборов для измерения давления в Национальном Бюро Стандартов. Первый Межд. Конгресс ИФАК по автоматическому управлению. Изд. АН СССР, 1960.

ТЕЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОЙ ЖИДКОСТИ В ПЛОСКОМ МАГНИТОГИДРОДИНАМИЧЕСКОМ КАНАЛЕ

Э. П. Зимиц
(Москва)

Течение электропроводной жидкости между двумя плоскими бесконечными параллельными непроводящими пластинами при наличии поперечного магнитного поля, нормального к плоскости пластин, впервые было рассмотрено Гартманом [1]. В дальнейшем эта задача была обобщена на случай вертикальной конвекции [2,3] и течение жидкости с анизотропной проводимостью [4-6]. При такой постановке поле скоростей между цилиндрами определяется однородным внешним магнитным полем, затем по известному решению для поля скоростей ищется индуцированное магнитное поле.

Ниже рассматривается аналогичное течение для случая, когда вектор напряженности магнитного поля лежит в плоскости, параллельной пластинам, а последние являются проводящими.

Обозначения

<p>E — напряженность электрического поля, G — число Гартмана, H — напряженность магнитного поля, N — число Грасгоффа, T — температура, w — скорость, Z — заряд электрона, b — полуширина канала, g — ускорение гравитационного поля, j — плотность тока, m — масса электрона,</p>	<p>p — давление, γ — параметр нагрузки, ϵ — диэлектрическая проницаемость, λ — теплопроводность, μ — динамическая вязкость, μ_e — магнитная проницаемость, ρ — плотность жидкости, σ — электрическая проводимость, τ — время свободного пробега электрона, φ — электрический потенциал.</p>
--	---

1. Стационарное течение несжимаемой вязкой жидкости с анизотропной проводимостью в магнитном поле в общем случае описывается системой уравнений

$$\rho (\mathbf{w} \nabla) \mathbf{w} = - \nabla p \mp \mu \Delta \mathbf{w} \mp \mu_e \mathbf{j} \times \mathbf{H}, \quad \nabla \cdot \mathbf{w} = 0, \quad \nabla \cdot \mathbf{j} = 0,$$

$$\mathbf{j} = \nabla \times \mathbf{H}, \quad \nabla \times \mathbf{E} = 0, \quad \mathbf{j} \mp \kappa \mathbf{j} \times \mathbf{H} = \sigma (\mathbf{E} \mp \mu_e \mathbf{w} \times \mathbf{H}) \quad \left(\kappa = \frac{Z \mu_e \tau}{m} \right) \quad (1.1)$$

Этой системе в частном случае течения между плоскими бесконечными параллельными проводящими пластинами $y = \pm b$ удовлетворяет решение вида

$$\mathbf{w} = (u, 0, 0), \quad \mathbf{j} = (j_x, j_y, 0), \quad \mathbf{H} = (0, 0, H), \quad \mathbf{E} = (E_x, E_y, 0)$$