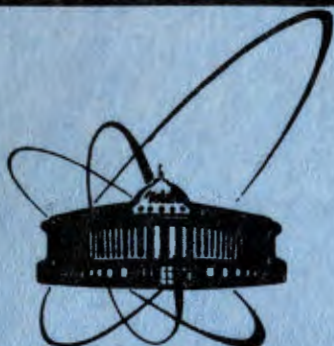


2818/84



**ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА**

18-84-43

**В.В.Овчинников, В.Д.Селезнев*, В.И.Кузнецов,
В.Д.Акиньшин****

**РАСЧЕТ
АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО ГАЗОАНАЛИЗАТОРА
МОСТИКОВОГО ТИПА
НА ЯДЕРНОЙ МЕМБРАНЕ**

Направлено в "Инженерно-физический журнал"

* Уральский политехнический институт им. С.М.Кирова
** Свердловский инженерно-педагогический институт

1984

Развитие научных исследований, при которых приходится иметь дело с газообразными веществами, а также практические производственные работы в различных отраслях нефтяной, газовой, угольной и химической промышленности выдвигают все новые и новые задачи в области анализа газов.

В последнее время разработан целый ряд новых методов и установок для анализа и разделения газовых смесей. Широкое применение получили различные физические методы, позволяющие автоматизировать газовый анализ. Многие из известных методов и приборов достаточно подробно описаны в ранее опубликованных руководствах по газовому анализу ^{/1,2/}.

Наибольший интерес представляют газоанализаторы непрерывного действия, позволяющие вести следящий контроль за составом газовой смеси в различных технологических линиях химического производства.

Рассмотрим лишь один из них - аэродинамический газоанализатор мостикового типа ^{/3/}. Он способен вести анализ практически любой газовой смеси. Однако наличие в одном из плеч моста газоанализатора регулятора расхода вследствие недостаточно высокой точности поддержания расхода газа постоянным /на уровне 3-5% / значительно ухудшает его рабочие характеристики.

В этой работе приводится расчет аэродинамического газоанализатора мостикового типа на ядерной мембране. Газоанализатор /рис.1/ содержит мост однотипных гидравлических сопротивлений 1-3, ядерную мембрану 4 и индикатор величины разницы давлений в диагонали моста 6. На входе анализатора давление газа поддерживается постоянным с помощью стабилизатора давлений 5. Наличие в одном из плеч мостика газоанализатора ядерной мембраны обеспечивает отличный от вязкостного режим течения газа, например, свободномолекулярный, условие перехода к которому описывается величиной числа Кнудсена - K_n /отношение длины свободного пробега газовых молекул к радиусу канала/, которое ≥ 100 . Как известно, ядерные мембраны изготавливаются путем бомбардировки пучком тяжелых ионов различных полимерных пленок ^{/4/} и представляют собой набор цилиндрических капилляров одинаковой длины с малой дисперсией пор по размерам. Используя мембраны подобного типа с диаметром пор $\sim 10,0$ нм и числом пор, обеспечивающим равенство потоков в плечах мостика, можно проводить анализ газовых смесей при давлении $\sim 10^5$ Па. Действительно, если через совокупность p параллельных каналов ядерной мембраны радиусом r и длиной l пропускать смесь газов в свободномолекулярном режиме течения, то вследствие отсутствия межмолекулярных столкновений

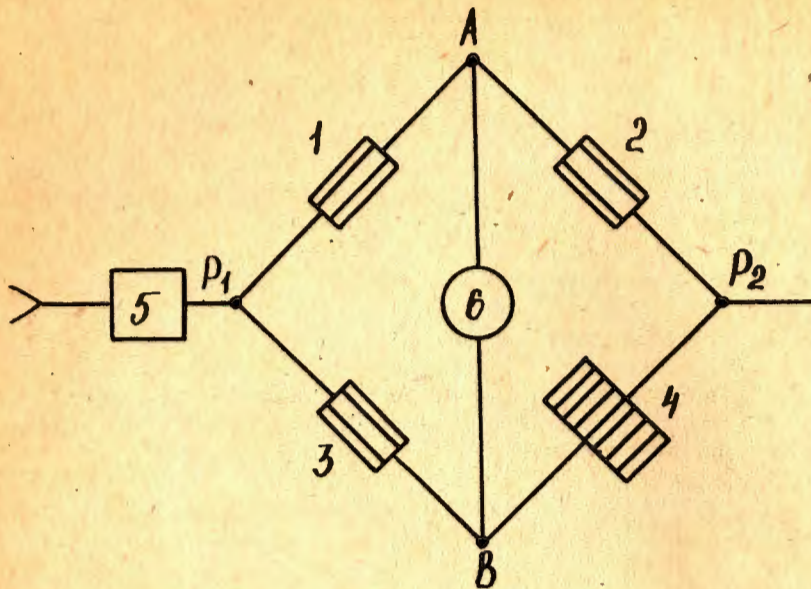


Рис.1. Принципиальная схема газоанализатора.

каждый компонент будет двигаться независимо от другого со скоростью, определяемой формулой Кнудсена

$$U_i = \frac{2}{3} \frac{r}{\ell} v_{ti} \cdot \frac{\Delta P_i}{P_i}, \quad /1/$$

где $v_{ti} = \left[\frac{8kT}{\pi m_i} \right]^{1/2}$, P_i , m_i - средняя тепловая скорость, давление и масса молекул i -го компонента.

Анализ проводится следующим образом. Пусть в начальном состоянии /смесь с исходной мольной долей компонент/ гидросопротивления подобраны так, что давление в точках А и В выравнено. При изменении состава газовой смеси расход после стабилизатора давлений изменится на некоторую величину ΔQ , что вызовет изменение перепада давлений на гидросопротивлениях 3-4 на величину ΔP , поскольку расход газа через гидросопротивление - ядерную мембрану 4 описывается формулой Кнудсена, то это приведет к сдвигу давлений между точками А и В на величину δP . Для решения задачи нахождения δP введем некоторые дополнительные условия. Считаем, что гидросопротивления 1-3 представляют собой длинные цилиндрические капилляры радиусом R и длиной L . В начальный момент для некоторой бинарной смеси газов с концентрацией легкого компонента C_1^0 и коэффициентом динамической вязкости η^0 при $R_1 = R_2 = R_3$, $L_1 = L_2 = L_3$ и площади ядерной мембраны, соответствующей усло-

вию равенства потоков $Q_3 = Q_4$, давление в точках А и В равно $\delta P = 0$. Поскольку рабочее давление анализатора можно считать близким к атмосферному, то расход газа через гидросопротивления - капилляры 1-3 опишется формулой Пуазейля для вязкостного режима течения газа

$$Q = \frac{\pi R^4}{8\eta^0 k T} \cdot \frac{(P_1^2 - P_2^2)}{2L}, \quad /2/$$

где P_1 и P_2 - давление на входе и выходе капилляра. На основании схемы газоанализатора запишем уравнения баланса потоков

$$Q_1 + Q_3 = Q_2 + Q_4, \quad /3/$$

$$Q_1 = Q_2,$$

$$Q_3 = Q_4,$$

при этом $P_1 - P_2 = \text{const}$, давление на выходе также остается неизменным. При протекании бинарной смеси газов через канал ядерной мембраны в свободномолекулярном режиме течения концентрация i -го компонента на выходе не будет соответствовать его концентрации на входе: наблюдается сдвиг концентраций /5/ на величину ΔC :

$$\Delta C = C_1 - C_1', \quad /4/$$

где $C_1 = \frac{Q_{KH1}}{Q_{KH1} + Q_{KH2}}$; C_1', C_1 - концентрации на входе и выходе

из канала по легкому компоненту, Q_{KH1}, Q_{KH2} - кнудсеновский расход 1-го и 2-го компонента. Изменение состава бинарной газовой смеси на величину δC_1 приведет к изменению коэффициента вязкости

$$\eta = \eta^0 + \Delta \eta (\delta C_1). \quad /5/$$

Тогда, учитывая /1/-/3/, запишем уравнения баланса потоков отдельно по каждому компоненту в плече моста газоанализатора, содержащем ядерную мембрану:

$$Q_3 C_1 = \frac{\pi R_3^4}{8\eta k T} \cdot \frac{P_1^2 - P_B^2}{2L_3} C_1 = Q_{KH1} = \frac{2}{3} p \cdot \frac{\pi r^3}{k T} v_{t1} \frac{P_B C_1' - P_2 C_1}{\ell}, \quad /6/$$

$$Q_3 C_2 = \frac{\pi R_3^4}{8\eta k T} \cdot \frac{P_1^2 - P_B^2}{2L_3} C_2 = Q_{KH2} = \frac{2}{3} p \cdot \frac{\pi r^3}{k T} v_{t2} \frac{P_B C_2' - C_2 P_2}{\ell}.$$

где p - число пор ядерной мембраны. Решение системы /6/ дает уравнение

$$P_1^2 - P_B^2 = \frac{B}{A} v_{t1} (P_B - P_2), \quad /7/$$

где

$$A = \frac{\pi R_3^4}{8\eta kT} \frac{1}{2L_3}, \quad B = \frac{2}{3} p \frac{\pi r^3}{kT} \cdot \frac{1}{l}, \quad V_t = \frac{V_{t1} \cdot V_{t2}}{C_1 V_{t2} + C_2 V_{t1}}$$

Для плеча с гидросопротивлениями 1-2 с учетом баланса потоков Q_1 и Q_2 и выражения /2/ имеем

$$P_A^2 = \frac{1}{2} (P_1^2 + P_2^2) = P_{B_0}^2, \quad /8/$$

где P_{B_0} - первоначальное давление в точке В, соответствующее коэффициенту вязкости η^0 .

Принимая во внимание условие равенства давлений в точках А и В при предварительной настройке газоанализатора по C_1^0 и η^0 , исходя из /7/ и /8/, запишем

$$\frac{B}{A} = \frac{D}{V_t^0 \eta^0}, \quad /9/$$

где

$$D = \frac{P_1^2 - P_2^2}{[2(P_1^2 + P_2^2)]^{1/2} - 2P_2}$$

Подставив /9/ в /7/, получим уравнение для P_B :

$$P_B = -V_t^* \eta^* \frac{D}{2} + [(V_t^* \eta^* \frac{D}{2})^2 + (V_t^* \eta^* D) P_2 + P_1^2]^{1/2}, \quad /10/$$

где $V_t^* = V_t / V_t^0$, $\eta^* = \eta / \eta^0$ - приведенные значения. Чувствительность анализа определим выражением

$$\xi_B = \frac{\partial P_B}{\partial C_1} = \frac{D}{2} \frac{P_B - P_2}{P_B + V_t^* \eta^* \frac{D}{2}} \left[\left(\frac{\partial V_t^*}{\partial C_1} \right) \eta^* + \left(\frac{\partial \eta^*}{\partial C_1} \right) V_t^* \right], \quad /11/$$

$$\text{где } \frac{\partial V_t^*}{\partial C} = V_t^* \frac{V_{t1} - V_{t2}}{C_1 V_{t2} + C_2 V_{t1}}$$

Для решения уравнения /11/ необходима аппроксимация коэффициента динамической вязкости бинарных газовых смесей.

Вильке /6/ предложил аппроксимацию, хорошо согласующуюся с экспериментальными значениями для водороднесодержащих смесей газов:

$$\eta = \eta_1 \frac{C_1}{C_1 + C_2 \phi_{1,2}} + \eta_2 \frac{C_2}{C_2 + C_1 \phi_{2,1}}, \quad /12/$$

где

$$\phi_{1,2} = \frac{[1 + (\eta_1 / \eta_2)^{1/2} (M_2 / M_1)^{1/2}]^2}{[8(1 + M_1 / M_2)]^{1/2}}, \quad \phi_{2,1} = \phi_{1,2} \eta_2 / \eta_1 \cdot M_1 / M_2$$

Дифференцируя уравнение /12/ по C_1 и подставляя его в выражение для коэффициента чувствительности /11/, получим зависимость, описывающую работу аэродинамического газоанализатора во всем диапазоне концентраций бинарной газовой смеси.

Рисунки 2 и 3 иллюстрируют расчетные значения давления в точке В и коэффициента чувствительности ξ_B мостика как функцию мольной доли легкого компонента бинарной газовой смеси /сплошные кривые - анализатор на ядерной мембране/.

Для расчетов были выбраны две системы газовых смесей: He-Ar и Ne-Kr /кривые 1 и 2 соответственно/, отличающиеся формами кривых зависимости коэффициента вязкости от концентрации компонент, в соответствии с чем для первой системы эта зависимость имеет максимум. /При расчетах давление на входах выбиралось равным 1,5 ат, на выходе - 1 ат, а исходная концентрация смеси $C_1^0 = 0,5$ /.

Для сравнения на рисунках также даны теоретические зависимости, соответствующие аэродинамическому газоанализатору мостикового типа с регулятором расхода газа /пунктирные кривые/, полученные путем решения системы /3/ при условии постоянства величины потока Q_4 :

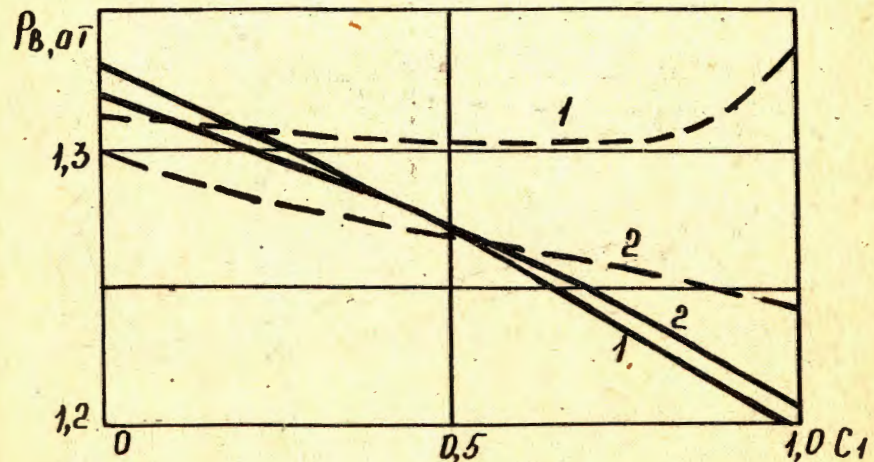


Рис.2. Зависимость давления в диагонали моста газоанализатора P_B от мольной доли легкого компонента бинарной газовой смеси C_1 . 1 - He-Ar, 2 - Ne-Kr.

$$P_B = [P_1^2 - \frac{\eta^*}{2}(P_1^2 - P_2^2)]^{1/2} \quad /13/$$

$$\xi_B = -\frac{1}{4} \frac{P_1^2 - P_2^2}{P_1^2 - \eta^*/2(P_1^2 - P_2^2)} \cdot \frac{\partial \eta^*}{\partial C_1} \quad /14/$$

Однако на практике строгое выполнение этого условия невозможно, так как известные регуляторы расхода газа типа РРВ-1 и др. имеют точность стабилизации расхода на уровне 5%. Это, в свою очередь, определит погрешности, равные для $P_B - 10^{-2}$ ат, а для $C_1 - 0,2$ /в соответствии с рис.3/.

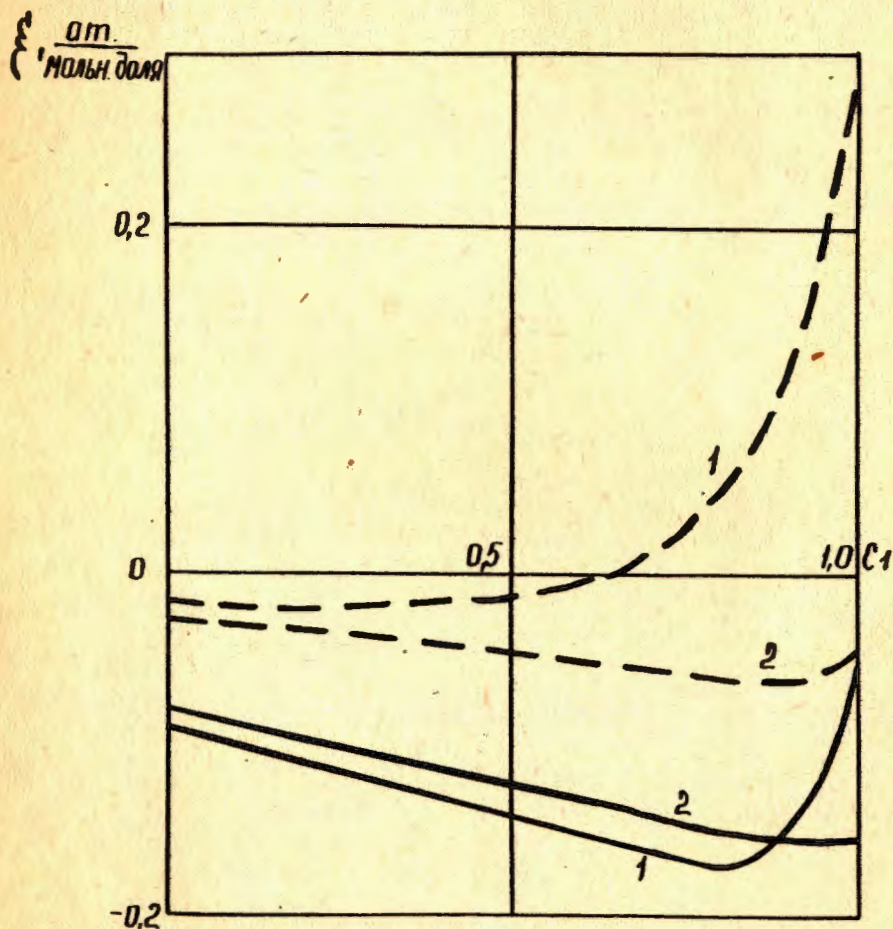


Рис.3. Чувствительность анализа ξ_B как функция мольной доли легкого компонента бинарной газовой смеси C_1 .
1 - He-Ar, 2 - Ne-Kr.

С другой стороны, анализ кривых на рис.2 показывает, что для систем типа He-Ar, характеризующихся максимумом вязкости для газоанализатора с регулятором расхода газа имеется минимум в зависимости давления P_B , которому соответствует концентрация $C_1 = 0,63$. При этом данной концентрации /как следует из рис.3/ соответствует нулевое значение чувствительности, а следовательно, существование "мертвой зоны", обусловленное пересечением кривой чувствительности с осью C_1 .

Для анализатора на ядерной мембране, напротив, имеется максимум в диапазоне концентраций C_1 от 0,5 до 0,8.

В целом, на основе анализа приведенных зависимостей можно сделать вывод, что точность измерений и чувствительность предлагаемой схемы аэродинамического газоанализатора мостикового типа на ядерной мембране будут выше /вне зависимости от рода газовой системы/, а изменение давления в диагонали моста имеет практически линейный характер, что является важным моментом для обеспечения автоматизированного следящего контроля за составом газовых смесей.

В заключение авторы выражают глубокую благодарность академику Г.Н.Флерову за плодотворные обсуждения и постоянный интерес к данной работе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Соколов В.А. Методы анализа газов. Гостоптехиздат, М., 1958, с. 375.
2. Ваня Я. Анализаторы газов и жидкостей. Энергия, М., 1970, с. 552.
3. Константинов Э.М. Авторское свидетельство СССР №472287, от 30.06.72 г. Бюлл. ОИПОТЗ, 1975, №20, с. 94.
4. Флеров Г.Н., Барашенков В.С. УФН, 1974, вып.2, 114, с. 261-369.
5. Селезнев В.Д., Тарин А.А., Породнов Б.Т. ЖТФ, 1981, 51, вып. 11, с. 2422-2423.
6. Wilke C.R. J.Chem.Phys., 1950, 18, p. 517.

Рукопись поступила в издательский отдел
10 апреля 1984 года.

НЕТ ЛИ ПРОБЕЛОВ В ВАШЕЙ БИБЛИОТЕКЕ?

Вы можете получить по почте перечисленные ниже книги, если они не были заказаны ранее.

	Труды VI Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1978 /2 тома/	7 р. 40 к.
	Труды VII Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, Дубна, 1980 /2 тома/	8 р. 00 к.
D11-80-13	Труды рабочего совещания по системам и методам аналитических вычислений на ЭВМ и их применению в теоретической физике, Дубна, 1979	3 р. 50 к.
D4-80-271	Труды Международной конференции по проблемам нескольких тел в ядерной физике. Дубна, 1979.	3 р. 00 к.
D4-80-385	Труды Международной школы по структуре ядра. Алушта, 1980.	5 р. 00 к.
D2-81-543	Труды VI Международного совещания по проблемам квантовой теории поля. Алушта, 1981	2 р. 50 к.
D10,11-81-622	Труды Международного совещания по проблемам математического моделирования в ядерно-физических исследованиях. Дубна, 1980	2 р. 50 к.
D1,2-81-728	Труды VI Международного семинара по проблемам физики высоких энергий. Дубна, 1981.	3 р. 60 к.
D17-81-758	Труды II Международного симпозиума по избранным проблемам статистической механики. Дубна, 1981.	5 р. 40 к.
D1,2-82-27	Труды Международного симпозиума по поляризационным явлениям в физике высоких энергий. Дубна, 1981.	3 р. 20 к.
P18-82-117	Труды IV совещания по использованию новых ядерно-физических методов для решения научно-технических и народнохозяйственных задач. Дубна, 1981.	3 р. 80 к.
D2-82-568	Труды совещания по исследованиям в области релятивистской ядерной физики. Дубна, 1982.	1 р. 75 к.
D9-82-664	Труды совещания по коллективным методам ускорения. Дубна, 1982.	3 р. 30 к.
D3,4-82-704	Труды IV Международной школы по нейтронной физике. Дубна, 1982.	5 р. 00 к.
D2,4-83-179	Труды XV Международной школы молодых ученых по физике высоких энергий. Дубна, 1982.	4 р. 80 к.
	Труды УШ Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Протвино, 1982 /2 тома/	11 р. 40 к.
D11-83-511	Труды совещания по системам и методам аналитических вычислений на ЭВМ и их применению в теоретической физике. Дубна, 1982.	2 р. 50 к.
D7-83-644	Труды Международной школы-семинара по физике тяжелых ионов. Алушта, 1983.	6 р. 55 к.
D2,13-83-689	Труды рабочего совещания по проблемам излучения и детектирования гравитационных волн. Дубна, 1983.	2 р. 00 к.

Заказы на упомянутые книги могут быть направлены по адресу:
101000 Москва, Главпочтамт, п/я 79
Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований

Овчинников В.В. и др.

18-84-43

Расчет аэродинамического газоанализатора мостикового типа на ядерной мембране

Приводится расчет коэффициента чувствительности и величины давления в диагонали моста аэродинамического газоанализатора мостикового типа на ядерной мембране. Вследствие осуществления свободно молекулярного режима течения в порах мембраны и наличия сдвига концентраций на ее поверхностях, для любой системы бинарных газовых смесей точность измерений и чувствительность анализа оказываются выше в сравнении с расчетными данными для газоанализатора мостикового типа, имеющего в одном из плеч регулятор расхода газа.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1984

Перевод О.С.Виноградовой

Ovchinnikov V.V. et al.

18-84-43

Calculation of Aerodynamic Gas Analyser of a Bridge Type on a Nuclear Membrane

Calculation of sensitivity and pressure value in a bridge diagonal of bridge type aerodynamic gas analyser having a nuclear membrane have been performed. Due to realization of free-molecular regime of gas flow in membrane pores and availability of concentration shift on its surfaces accuracy and sensitivity values of the analysis lie above the calculation data for aerodynamic gas analyser of bridge type having a gas flow regulator for any binary gas mixture systems.

The investigation has been performed at the Laboratory of Nuclear Reactions, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1984