

REFERENCE 172

A. V. KAMAEV, B. G. DUBOVSKII, V. V. VAVILOV, G. A. POPOV, Yu. D. PALAMARCHUK, AND S. P. IVANOV, "EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF EFFECTS OF INTERACTION OF TWO SUBCRITICAL REACTORS," TRANSLATED FROM A PUBLICATION OF THE STATE COMMITTEE OF THE COUNCIL OF MINISTER OF THE USSR ON THE UTILIZATION OF ATOMIC ENERGY, MOSCOW, 1960, U. S. ATOMIC ENERGY COMMISSION REPORT AEC-TR-4708 (U. S. DEPARTMENT OF ENERGY, TECHNICAL INFORMATION CENTER, OAK RIDGE, TENNESSEE).

AEC/tr-4708

A translation of: Eksperimental'noe Izuchenie Effektov
Vzaimodeistviya Dvukh Podkriticheskikh Reaktorov. A. V.
Kamaev et al. Glavnoe Ypravlenie po Ispol'zovaniyu Atomnoi
Energii pri Sovete Ministrov S.S.S.R., Moskva, 1960.

Translated by the U. S. Joint Publications Research Service,
New York, a federal government organization established to
service the translation and research needs of the various
government departments.

In the interest of expeditious dissemination this publication
has been reproduced directly from copy prepared by the
translating agency.

A. V. Kam^gnev, B. G. Dubovskii, V. V. Vavilov, G. A. Popov, Yu. D. Palamarchuk, S. P. Ivanov

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF EFFECTS OF INTERACTION OF TWO SUBCRITICAL REACTORS

ABSTRACT

In the present paper we report the results of experiments on the interaction between two homogeneous cylindrical reactors without reflector in usual air medium, and two heterogeneous cylindrical reactors in aqueous medium.

An understanding of the question of effectiveness of interaction of subcritical reactors is important in the design and operation of radio chemical plants, in the organization of warehouses, and in the transportation of fissionable material.

EXPERIMENTS WITH HOMOGENEOUS REACTORS

In the experiments we determine the critical state of a system consisting of two cylindrical homogeneous reactors, spaced different distances apart.

The experimental setup consisted of a frame on which the two cylindrical reactors were mounted. One was secured on a stationary base, and the other on a carriage moving along the frame. The walls of the cylinders were made of 1Kh18N9T stainless steel 1.5 mm thick. Each cylinder was provided with a scram rod which dropped into the center of the active zone whenever a specified power level was exceeded. The active zone of the reactor was an aqueous solution of $UO_2(NO_3)_2$

with 90% enriched uranium. The distance between cylinders could be varied from zero to 120 cm. Obviously, in the presence of interaction, each reactor separately was subcritical even in the case when the system was critical as a whole. In the experiments we

establish the connection between the degree of subcriticality of one reactor (if it is considered separate from the other) and the distance between two identical reactors, at which these reactors form a critical system.

The experiment was carried out in the following fashion. The aqueous solution of $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2$ was introduced simultaneously into both

cylinders, placed adjacent to each other, until the system became critical. The cylinders were then moved apart a certain distance. The system then became subcritical. In order to attain criticality, a new batch of solution was introduced simultaneously in both cylinders. The cylinders were moved apart and filled with new batches of solution up to a position in which both cylinders became critical independently of each other, i.e., up to a position in which the effect of interaction disappears. The system of control and regulation was such that the behavior of the reactors could be studied separately as well as of the system as a whole. The results of the experiments with homogeneous reactors are listed in Table 1 and are illustrated in Figs. 1 and 2. In each individual experiment, the two interacting reactors were identical in dimensions and composition of active zone. The effective multiplication coefficient of the reactor was calculated from the formula

$$K_{\text{eff}} = \frac{(1 + \chi_0^2 \tau)(1 + \chi_0^2 L^2)}{(1 + \chi^2 \tau)(1 + \chi^2 L^2)}, \quad (1)$$

where χ_0 is the geometric parameter of the critical reactor,

the geometric parameter of the subcritical reactor. In experiments 1, 2, 3 the reactors were not provided with reflectors, while in experiments 4 and 5 the reactors were placed on a graphite stack forming the lower side reflector and the vertical side wall, along which the moving cylinder moved. The dependence of K_{eff} on the

distance between the reactors, obtained in the first three experiments, is shown in Fig. 2.

EXPERIMENTS WITH HETEROGENEOUS REACTORS

The experimental setup consisted of a steel tank 2.5 meters high, 2.1 meters in diameter, with thickness 5 mm thick. On the bottom of the tank was installed a steel baseplate with racks. On the racks were mounted two control grids of aluminum with openings for channels with uranium blocks. The active zone was made up of the uranium

blocks with 2% and 10% enrichment. The distance between reactors was changed by recharging the channels in the grid. The critical state was reached by filling the tank with water. The experimental procedure was analogous to that described for the homogeneous reactors. The results of the experiment are listed in Table 2 and are illustrated in Figs. 3 and 4.

The experiments have shown that the aggregate of two approximately equilateral subcritical reactors, mounted flush next to each other, with $K_{\text{eff}} = 0.94$ for each reactor, is critical. Two identical

subcritical reactors in cylindrical form, with $H/D = 1$ and K_{eff}

0.9 for each, cannot form a critical system with K_{∞} not exceeding a value 2.0.

The effective interaction of two identical subcritical reactors for given K_{∞} (coefficient of multiplication in infinite medium) is determined by the solid angle between the adjacent surfaces.

The effectiveness of interaction of two subcritical reactors in water at large distances is much less than in air. In the presence of 30 cm of water shielding between two reactors, their interaction contribution to K_{eff} can be neglected, accurate to 0.1%.

Table 1

<u>О П И Т 1</u>										
D = 300 мм	г, см	0	3	6	12	30	60	90	105	120
V ₀ = 22,3 л	л	37,5	39,4	40,6	41,9	43,46	44,2	44,4	44,6	44,6
C = 105 л/л	K _{эфф}	0,947	0,963	0,973	0,982	0,993	0,998	0,998	1,0	1,0
ρ _H /ρ _B = 260, K = 2,032	H, см	26,5	27,9	28,7	29,6	30,8	31,2	31,3	31,5	31,5

<u>О П И Т 2</u>										
D = 300 мм	г, см	0	7,5	15	30	60	90	120		
V ₀ = 29,7 л	л	46,6	52,4	54,1	55,9	57,6	58,3	58,4		
C = 74 л/л	K _{эфф}	0,948	0,976	0,9820	0,9890	0,9940	0,996	0,997		
ρ _H /ρ _B = 380, K = 1,908	H, см	33	37,4	38,2	39,5	40,8	41,2	41,3		

<u>О П И Т 3</u>										
D = 300 мм	г, см	0	7,5	15	30	60	90	120		
V ₀ = 44,95 л	л	58,0	69,0	74,0	80,0	85,0	87,0	87,5		
C = 55 л/л	K _{эфф}	0,9420	0,9690	0,9780	0,9870	0,9940	0,9960	0,9960		
ρ _H /ρ _B = 520, K = 1,81	H, см	41,0	48,8	52,4	56,6	60	61,5	62		

<u>О П И Т 4</u>										
D = 300 мм	г, см	0	5	15	30	60	110			
V ₀ = 22,4 л	л	32,8	35,8	39,1	41,6	43,4	44,4			
C = 70 л/л	H, см	23,2	25,3	27,6	29,5	30,8	3,14			
ρ _H /ρ _B = 360, K = 1,9										

<u>О П И Т 5</u>										
D = 254 мм	г, см	0	5	15	30	60	110			
C = 70 л/л	л	32,4	37,1	44,7	52,5	62,6	70,0			
ρ _H /ρ _B	H, см	32	37	44	52	62	70			

(See next page for captions)

Table 1

RESULTS OF EXPERIMENTS WITH HOMOGENEOUS REACTORS

Experiment 1

$d = 300$ mm r , cm

$V_0 = 22.3$ liters, V , liters

$C = 105$ g/liter K_{eff}

$\rho_H / \rho_S = 260$, $K = 2.032$, H , cm

REMARK

The following notation is used in the table: D — diameter of active zone; V_0 — critical volume of one isolated reactor; C — concentration of uranium in solution (grams/liter), ρ_H / ρ_S — ratio of nuclear concentrations of hydrogen and U-235; r — distance between reactor; V — critical volume of system of two reactors; H — height of reactor; K_{eff} — effective multiplication coefficient of one interacting reactor (regarded as isolated from the other).

Table 2

<u>О П И Т 1</u>		г, см	0	3,4	7,9	12,4	16,9	21,4	25,9	30,4	34,9	39,4
$R_{\text{ЭКВ}}$	= 29,8 см	Р, кг	20,66	28,8	37,9	42,8	44,4	45,5	46,4	47,2	48	48,6
P_0	= 24,45 кг	$K_{\text{эфф}}$	0,967	0,9826	0,9937	0,9971	0,9980	0,9985	0,9989	0,9994	0,9997	0,9999
ρ_H/ρ_S	= 287	Н, см	85,3	119	156,5	176,5	183,5	188	191,5	195	198	201

<u>О П И Т 2</u>		г, см	0,9	5,4	9,9	14,4	18,9	23,4
$R_{\text{ЭКВ}}$	= 33,3 см	Р, кг	23,74	26,8	28,86	29,46	29,7	29,9
P_0	= 15,1 кг	$K_{\text{эфф}}$	0,980	0,991	0,997	0,999	0,9995	1,000
ρ_H/ρ_S	= 287	Н, см	80,2	90,6	97,6	99,6	100,4	100,8

<u>О П И Т 3</u>		г, см	4,4	9,9	15,5
$R_{\text{ЭКВ}}$	= 24 см	Р, кг	11,2	13,98	15,2
P_0	= 8,25 кг	$K_{\text{эфф}}$	0,981	0,994	0,997
ρ_H/ρ_S	= 578	Н, см	92,1	114,9	125

RESULTS OF EXPERIMENTS WITH HETEROGENEOUS REACTORS

REMARK

Experiment 1

r , cm.
 $R_{\text{eq}} = 29.8$ cm P , kg.
 $P_0 = 24.45$ kg K_{eff} .
 $\rho_H/\rho_S = 287$ H , cm.

The following notation is used in the table: R_{eq} — equivalent radius of reactor; P_0 — critical mass of one isolated reactor (in kilograms of U-235); ρ_H/ρ_S — ratio of nuclear concentrations of hydrogen and U-235; r — distance between reactors; P — critical mass of system of two reactors (in kilograms of U-235); H — height of reactor; K_{eff} — effective coefficient of multiplication of reactor, calculated by formula (1).

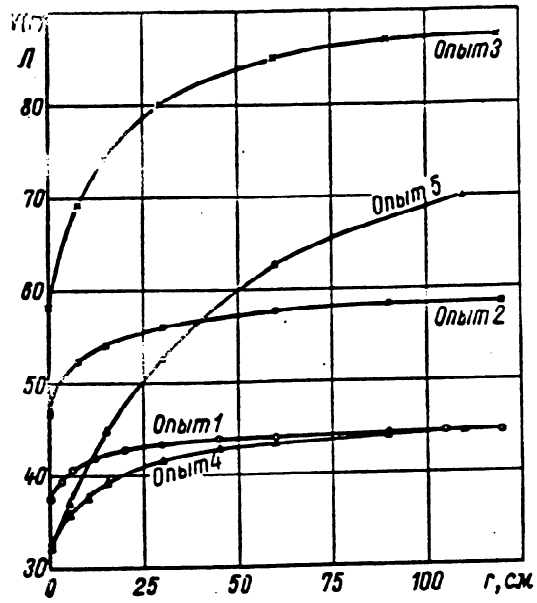


Fig. 1. Dependence of critical volume of system of two homogeneous reactors on the distance between interacting reactors.

1) Experiment 3, etc.

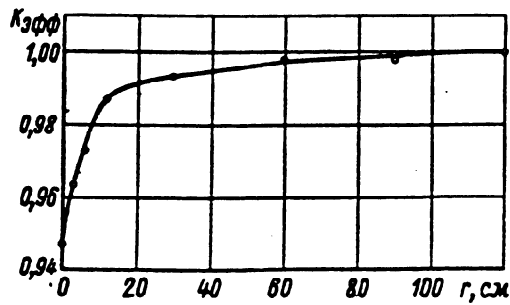


Fig. 2. Dependence of K_{eff} on one of the interacting homogeneous reactors on the distance between them.

1) K_{eff} .

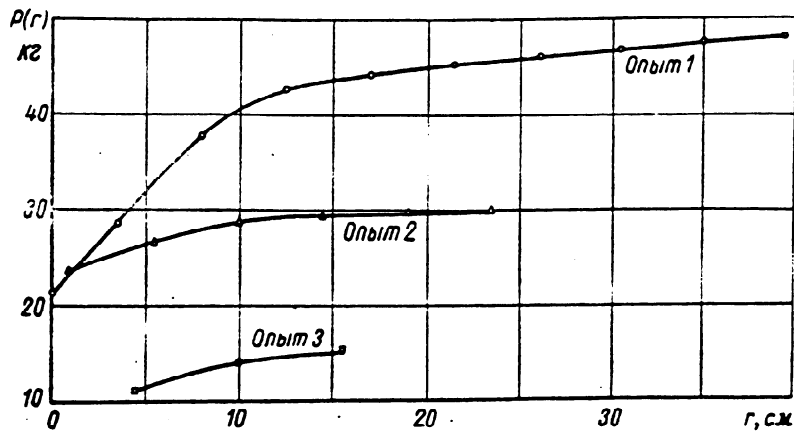


Fig. 3. Dependence of critical mass of system of two heterogeneous reactors on the distance between interacting reactors.

1) Experiment 1, etc.

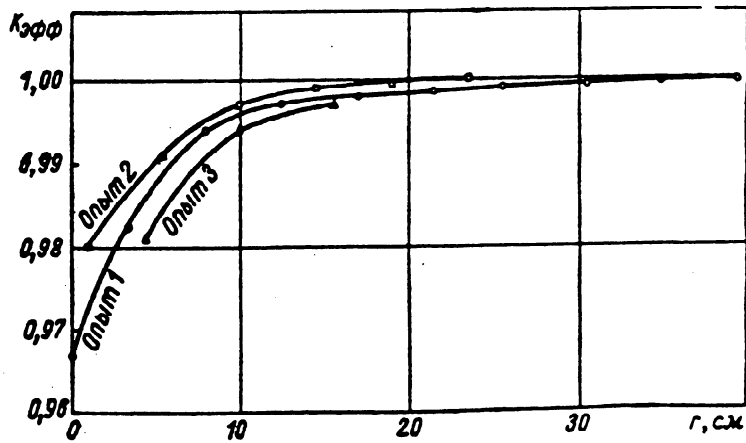


Fig. 4. Dependence of K_{eff} of one of the interacting heterogeneous reactors on the distance between them.

1) K_{eff} , 2) Experiment 2, etc.

**А. В. КАМАЕВ, Б. Г. ДУБОВСКИЙ, В. В. ВАВИЛОВ,
Г. А. ПОПОВ, Ю. Д. ПАЛАМАРЧУК, С. П. ИВАНОВ**

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ
ЭФФЕКТОВ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ДВУХ
ПОДКРИТИЧЕСКИХ РЕАКТОРОВ**

ГЛАВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ
ПРИ СОВЕТЕ МИНИСТРОВ СССР

*А. В. Камаев, Б. Г. Дубовский, В. В. Вавилов, Г. А. Попов,
Д. Д. Паламарчук, С. П. Иванов*

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ ЭФФЕКТОВ
ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ДВУХ ПОДКРИТИЧЕСКИХ РЕАКТОРОВ

1 9 6 0

АННОТАЦИЯ

В настоящей работе излагаются результаты опытов по изучению взаимодействия двух гомогенных цилиндрических реакторов без отражателя в обычной воздушной среде и двух гетерогенных цилиндрических реакторов в водной среде.

Понимание вопроса эффективности взаимодействия подкритических реакторов важно при проектировании и эксплуатации радиохимических заводов, при организации складов и транспортировке делящихся веществ.

ОПЫТЫ С ГОМОГЕННЫМИ РЕАКТОРАМИ

В опытах определялось критическое состояние системы, состоящей из двух цилиндрических гомогенных реакторов, при различных расстояниях между ними.

Экспериментальная установка состояла из рамы с укрепленными на ней двумя цилиндрами-реакторами. Один из них был укреплен на неподвижном основании, второй - на тележке, передвигавшейся вдоль рамы. Стенки цилиндров были выполнены из нержавеющей стали IX18N9T толщиной 1,5 мм. Каждый цилиндр был снабжен аварийным стержнем, падавшим в центр активной зоны в случае превышения заданного уровня мощности. Активная зона реактора - водный раствор соли $UO_2(NO_3)_2$ с ураном 90% обогащения. Расстояние между цилиндрами можно было

менять от 0 до 120 см. Очевидно, что при наличии взаимодействия каждый реактор в отдельности был подкритическим даже в случае критичности системы в целом. В опытах устанавливалась связь между степенью подкритичности одного реактора (если рассматривать его изолированно от другого) и расстоянием между двумя одинаковыми реакторами, при котором эти реакторы образуют критическую систему.

Опыт проводился следующим образом. Водный раствор $UO_2(NO_3)_2$ вводился одновременно в оба цилиндра, поставленные вплотную друг к другу, до достижения критического состояния системы. Затем цилиндры раздвигались на некоторое расстояние. Система становилась подкритической. Чтобы достичь критичности, новая порция раствора вводилась одновременно в оба цилиндра. Цилиндры раздвигались и заливались новыми порциями раствора до положения, в котором оба цилиндра становились критическими независимо один от другого, т.е. до положения, в котором эффект взаимодействия равен нулю. Система контроля и управления была выполнена таким образом, что позволяла следить за поведением реакторов в отдельности и системы в целом. Результаты опытов с гомогенными реакторами сведены в табл. I и представлены на рис. I и 2. В каждом отдельном опыте два взаимодействующих реактора были одинаковыми по размерам и составу активной зоны. Эффективный коэффициент размножения реактора вычислялся по формуле:

$$K_{\text{эфф}} = \frac{(1 + \chi_0^2 \tau)(1 + \chi_0^2 L^2)}{(1 + \chi^2 \tau)(1 + \chi^2 L^2)}, \quad (1)$$

где χ_0 - геометрический параметр критического реактора, χ - геометрический параметр подкритического реактора. В опытах 1, 2, 3 реакторы не имели отражателей, в опытах 4 и 5 реакторы были установлены на графитовой кладке, образующей нижний торцевой отрагатель и

РЕЗУЛЬТАТЫ ОПЫТОВ С ГОМОГЕННЫМИ РЕАКТОРАМИ

О П Ы Т 1			0	3	6	12	30	60	90	105	120
D = 300 мм	г, см										
V ₀ = 22,3 л	V, л		37,5	39,4	40,6	41,9	43,46	44,2	44,4	44,6	44,6
C = 105 г/л	K _{эфф}		0,947	0,963	0,973	0,982	0,993	0,998	0,998	0,998	0,998
ρ _H /ρ _S = 260, K = 2,032	H, см		26,5	27,9	28,7	29,6	30,8	31,2	31,3	31,5	31,5

О П Ы Т 2			0	7,5	15	30	60	90	120
D = 300 мм	г, см								
V ₀ = 29,7 л	V, л		46,6	52,4	54,1	55,9	57,6	58,3	58,4
C = 74 г/л	K _{эфф}		0,948	0,976	0,9820	0,9890	0,9940	0,996	0,997
ρ _H /ρ _S = 380, K = 1,908	H, см		33	37,4	38,2	39,5	40,8	41,2	41,3

О П Ы Т 3			0	7,5	15	30	60	90	120
D = 300 мм	г, см								
V ₀ = 44,95 л	V, л		58,0	69,0	74,0	80,0	85,0	87,0	87,5
C = 55 г/л	K _{эфф}		0,9420	0,9690	0,9780	0,9870	0,9940	0,9960	0,9960
ρ _H /ρ _S = 520, K = 1,81	H, см		41,0	48,8	52,4	56,6	60	61,5	62

<u>О П Ы Т 4</u>			0	5	15	30	60	110
D	= 300 мм	r, см						
V ₀	= 22,4 л	V, л	32,8	35,8	39,1	41,6	43,4	44,4
C	= 70 г/л	H, см	23,2	25,3	27,6	29,5	30,8	3,14
ρ _H /ρ _S	= 360, К-1,9							

<u>О П Ы Т 5</u>			0	5	15	30	60	110
D	= 254 мм	r, см						
C	= 70 г/л	V, л	32,4	37,1	44,7	52,5	62,6	70,0
ρ _H /ρ _S		H, см	32	37	44	52	62	70

П р и м е ч а н и е: В таблице приняты следующие обозначения: D - диаметр активной зоны; V₀ - критический объем одного изолированного реактора; C - концентрация урана в растворе (г/л), ρ_H/ρ_S - отношение ядерных концентраций водорода и U²³⁵; r - расстояние между реакторами; V - критический объем системы двух реакторов; H - высота реактора; K_{эфф} - эффективный коэффициент размножения одного взаимодействующего реактора (если рассматривать его изолированно от другого).

вертикальную боковую стенку, вдоль которой перемещался подвижный цилиндр. Зависимость $K_{эфф}$ от расстояния между реакторами, полученная в первых трех опытах, показана на рис.2.

ОПЫТЫ С ГЕТЕРОГЕННЫМИ РЕАКТОРАМИ

Экспериментальная установка представляла собой стальной бак высотой 2,5 м, диаметром 2,1 м, со стенками толщиной 5 мм. На дне бака была установлена стальная

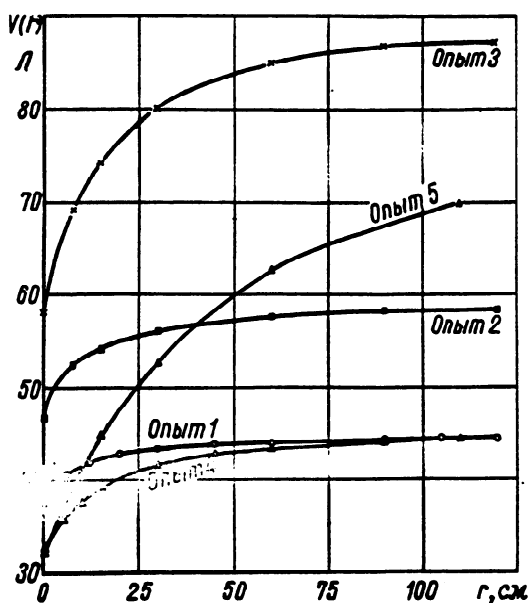


Рис.1 Зависимость критического объема системы двух однородных реакторов от расстояния между взаимодействующими реакторами.

опорная плита со стойками. На стойках были укреплены две направляющие решетки из алюминия с отверстиями для каналов с урано-

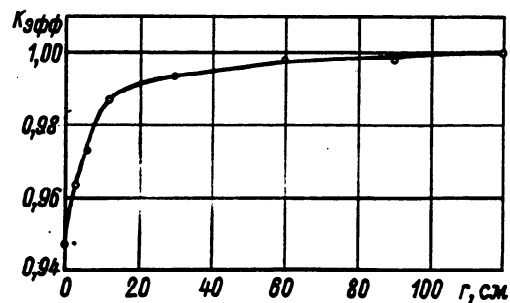


Рис.2 Зависимость $K_{эфф}$ одного из взаимодействующих однородных реакторов от расстояния между ними.

выми блоками. Активная зона собиралась из урановых блоков с обогащением 2% и 10%. Изменение расстояния между реакторами осуществлялось путем перегрузки каналов в решетке. Критическое состояние достигалось наполнением бака водой. Методика проведения опытов аналогична описанной для однородных реакторов. Результаты опытов сведены в табл.2 и представлены на рис.3 и 4.

Таблица 2

РЕЗУЛЬТАТЫ ОПЫТОВ С ГЕТЕРОГЕННЫМИ РЕАКТОРАМИ

<u>О П Ы Т 1</u>		г, см	0	3,4	7,9	12,4	16,9	21,4	25,9	30,4	34,9	39,4
$R_{\text{ЭКВ}}$	= 29,8 см	Р, кг	20,66	28,8	37,9	42,8	44,4	45,5	46,4	47,2	48	48,6
P_0	= 24,45 кг	$K_{\text{эфф}}$	0,967	0,9826	0,9937	0,9971	0,9980	0,9985	0,9989	0,9994	0,9997	0,9999
ρ_H/ρ_S	= 287	н, см	85,3	119	156,5	176,5	183,5	188	191,5	195	198	201

<u>О П Ы Т 2</u>		г, см	0,9	5,4	9,9	14,4	18,9	23,4
$R_{\text{ЭКВ}}$	= 33,3 см	Р, кг	23,74	26,8	28,86	29,46	29,7	29,9
P_0	= 15,1 кг	$K_{\text{эфф}}$	0,980	0,991	0,997	0,999	0,9995	1,000
ρ_H/ρ_S	= 287	н, см	80,2	90,6	97,6	99,6	100,4	100,8

<u>О П Ы Т 3</u>		г, см	4,4	9,9	15,5
$R_{\text{ЭКВ}}$	= 24 см	Р, кг	11,2	13,98	15,2
P_0	= 8,25 кг	$K_{\text{эфф}}$	0,981	0,994	0,997
ρ_H/ρ_S	= 578	н, см	92,1	114,9	125

П р и м е ч а н и е: В таблице приняты следующие обозначения: $R_{\text{ЭКВ}}$ — эквивалентный радиус реактора; P_0 — критическая масса одного изолированного реактора (в килограммах U^{235}); ρ_H/ρ_S — отношение ядерных концентраций водорода и U^{235} ; r — расстояние между реакторами; P — критическая масса системы двух реакторов (в килограммах U^{235}); h — высота реактора; $K_{\text{эфф}}$ — эффективный коэффициент размножения реактора, вычисленный по формуле (1).

Эксперименты показали, что совокупность двух вплотную установленных примерно равносторонних подкритических реакторов с $K_{эфф} = 0,94$

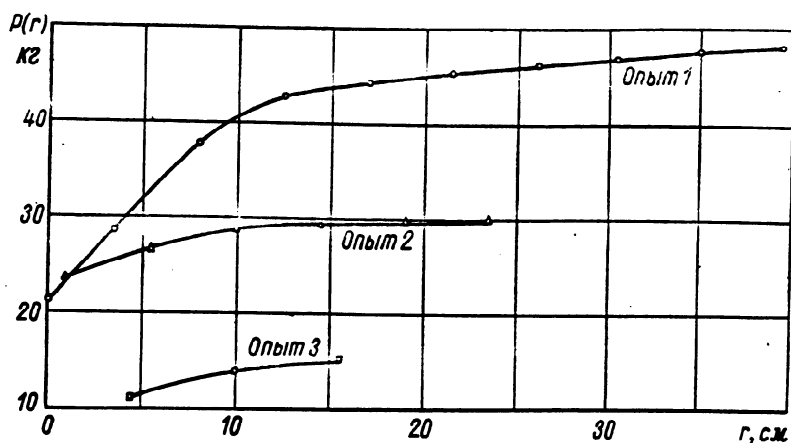


Рис.3 Зависимость критической массы системы двух гетерогенных реакторов от расстояния между взаимодействующими реакторами.

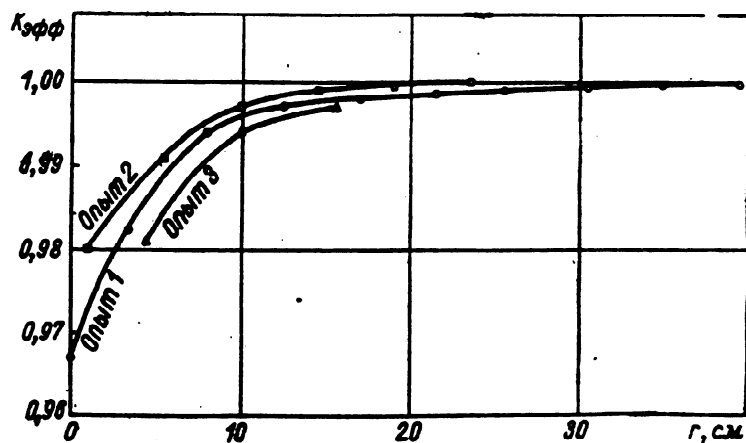


Рис.4 Зависимость $K_{эфф}$ одного из взаимодействующих гетерогенных реакторов от расстояния между ними.

для каждого, является критичной. Два одинаковых подкритических цилиндрических реактора с $n/D = 1$ и $K_{эфф} < 0,94$ каждый, при K_{∞} не превышающем значение 2,0, не могут образовать критическую систему.

Эффективное взаимодействие двух одинаковых подкритических реакторов при данном K_{∞} (коэффициент размножения в бесконечной среде) определяется телесным углом между прилегающими поверхностями.

Эффективность взаимодействия двух подкритических реакторов в воде на больших расстояниях существенно меньше, чем в воздухе. При наличии 30 см защитного слоя воды между двумя реакторами взаимодействием между ними с точностью до 0,1% в $K_{\text{эфф}}$ можно пренебречь.

Отпечатано на ротапинтере.

Заказ .72 Т-03638 тир.200
ИТМ и ВТ АН СССР Москва, Ленинский проспект, 51