

УДК 536.24

ТАБЛИЧНЫЙ МЕТОД РАСЧЕТА КРИТИЧЕСКОГО ТЕПЛОВОГО ПОТОКА В ВОДООХЛАЖДАЕМЫХ ТРЕУГОЛЬНЫХ СБОРКАХ СТЕРЖНЕЙ

*Бобков В.П., Виноградов В.Н., Кириллов П.Л., Смогалева И.П.**(ГНЦ РФ—ФЭИ им. А.И. Лейпунского)*

Кризис теплоотдачи в стержневых сборках — явление более сложное, чем в одиночных каналах простой формы. Сложность определяется не только формой сечения ячеек пучков, но и параллельностью включения этих каналов и их гидродинамическим и тепловым взаимодействием на всем протяжении теплосъема. Играть роль и периферийные каналы, и наличие необогреваемых поверхностей, и неравномерность обогрева по сечению и длине, и наличие дистанционирующих решеток, и тепловая разверка (разница подогревов) между периферийными и внутренними (правильными, симметричными) макроячейками. Под макроячейками понимается часть проходного сечения сборки, заключенного между соседними стержнями или между стержнями и обечайкой.

Новый метод расчета критического теплового потока в сборках основан на использовании таблицы для пучков [1, 2] (см. таблицу). В таблице выделены области, обеспеченные экспериментами в трубах, кольцевых каналах и пучках стержней (обведено сплошной линией). Области экспериментов для пучков дополнительно заштрихованы. При формировании таблицы использованы данные (около 30 работ) банка данных ФЭИ: треугольная решетка, шестиугольная обечайка, число стержней 3, 7, 19, 37, $1,5 \leq P \leq 20$ МПа, $50 \leq G \leq 5040$ кг/(м²·с), $-0,52 \leq X \leq 0,9$, $1,02 \leq s/d \leq 1,52$ — всего около 5000 экспериментальных точек для равномерного по длине обогрева. Перед использованием в анализе все данные были приведены к состоянию критического теплового потока в гладких пучках (без влияния дистанционирующей решетки [2]) с помощью соотношений работы [3].

Метод расчета на основе табличных значений состояния критического теплового потока в пучках стержней рекомендуется как для областей, обеспеченных экспериментальными данными, так и других областей параметров, где данных нет. Методика экстраполяции и интерполяции разработана в ФЭИ [4—7], учитывает основные тенденции изменения критического теплового потока по параметрам в трубах, кольцевых каналах и пучках стержней. Преимущества табличной методики — предельно широкая область параметров, плавность изменения состояния критического теплового потока по параметрам, наглядность, высокая надежность и точность, удобство использования в расчетах. Получены следующие среднестатистические погрешности описания отдельных работ по пучкам: по входным параметрам — среднее отклонение ± 1 —7%, среднеквадратичная ошибка 3—10%; по выходным параметрам ± 3 —15%, 5—20% соответственно.

Критический тепловой поток в пучках по таблице можно рассчитывать двумя методами.

1. Использование локальных в данном сечении параметров макроячеек. Для каждой макроячейки пучка необходимо знать локальные режимные параметры потока в выходном сечении (в месте предполагаемого кризиса): давление, массовую скорость, балансное паросодержание. Они могут быть найдены путем теплогидравлического расчета по доступным и достоверным методам-программам (см. ПУЧОК-2 [8] или VEVERKA [9]). Зная давление, массовую скорость и паросодержание, по прилагаемой таблице определяем критический тепловой поток для каждой макроячейки (предполагается, что макроячейки немного различаются по своим характеристикам). Далее для каждой макроячейки определяем $Q_{кр.яч}$ с учетом поправок на тепловой диаметр, шаг, обогреваемую длину и характеристики дистанционирующей решетки по формуле

Таблица для критического теплового потока в правильных треугольных пучках стержней
для теплового диаметра 9,36 мм, относительного шага решетки 1,4, версия 1997 г.

P, кПа	G, кг/(м²·с)	X															
		-0,5	-0,4	-0,3	-0,2	-0,1	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	
100	50	-	-	-	628	242	136	123	126	130	131	124	101	77	61	45	
100	100	-	-	-	694	324	214	223	232	243	248	239	195	151	110	70	
100	200	-	-	-	747	417	279	287	292	291	275	255	207	171	124	77	
100	300	-	-	-	799	516	349	356	357	343	303	270	219	192	138	84	
100	500	-	-	-	902	652	434	457	449	441	421	355	238	185	133	81	
100	750	-	-	-	1039	764	531	552	539	497	494	433	278	179	129	80	
100	1000	-	-	-	1184	885	640	657	636	555	573	520	321	169	123	76	
100	1500	-	-	-	1432	1072	802	804	772	737	770	681	372	160	117	73	
100	2000	-	-	-	1660	1247	950	946	885	879	868	720	343	98	75	52	
100	3000	-	-	-	2136	1620	1278	1254	1064	930	797	528	220	41	37	33	
100	4000	-	-	-	2711	2024	1646	1614	1312	932	661	390	194	92	71	50	
100	5000	-	-	-	3461	2471	2083	1985	1685	1270	942	648	388	198	142	86	
200	50	-	-	-	632	292	196	152	140	140	140	134	111	90	70	50	
200	100	-	-	-	707	372	252	238	246	253	253	248	210	167	121	75	
200	200	-	-	-	770	471	321	316	318	312	295	274	223	184	133	81	
200	300	-	-	-	834	577	394	400	395	375	339	301	235	202	144	87	
200	500	-	-	-	943	724	501	512	491	452	419	351	240	189	136	83	
200	750	-	-	-	1081	845	603	605	579	510	485	410	265	183	132	81	
200	1000	-	-	-	1227	975	716	706	674	570	556	473	290	173	125	77	
200	1500	-	-	-	1475	1169	882	852	810	727	699	576	313	132	98	64	
200	2000	-	-	-	1710	1357	1038	999	939	840	770	614	297	87	68	49	
200	3000	-	-	-	2217	1759	1376	1309	1141	922	757	509	219	41	37	34	
200	4000	-	-	-	2903	2187	1753	1656	1342	954	679	408	209	93	72	51	
200	5000	-	-	-	3734	2648	2169	2028	1727	1289	958	657	395	197	141	85	
300	50	-	-	-	636	341	256	180	154	150	149	145	120	104	79	54	
300	100	-	-	-	720	421	291	253	259	264	259	257	225	183	132	81	
300	200	-	-	-	794	525	362	345	343	334	315	293	238	197	141	86	
300	300	-	-	-	869	637	439	444	433	408	374	331	252	212	151	90	
300	500	-	-	-	984	796	568	567	533	464	416	347	242	193	138	84	
300	750	-	-	-	1124	925	676	658	619	523	476	386	252	187	134	82	
300	1000	-	-	-	1270	1064	793	756	711	585	539	426	259	176	127	78	
300	1500	-	-	-	1517	1266	963	900	849	717	628	471	253	104	79	54	
300	2000	-	-	-	1760	1467	1125	1051	993	802	672	508	251	77	61	45	
300	3000	-	-	-	2297	1899	1475	1364	1218	914	718	490	217	42	38	34	
300	4000	-	-	-	3095	2350	1861	1699	1372	976	697	425	224	95	73	51	
300	5000	-	-	-	4009	2825	2256	2072	1769	1307	975	666	402	195	140	85	
400	50	-	-	-	648	375	283	200	172	165	161	147	123	115	87	58	
400	100	-	-	-	746	467	312	289	293	295	283	274	250	211	150	90	
400	200	-	-	-	834	585	415	400	392	359	332	302	265	228	162	96	
400	300	-	-	-	925	711	524	520	498	427	383	331	279	245	173	101	
400	500	-	-	-	1048	867	655	635	587	487	410	319	244	201	144	87	
400	750	-	-	-	1195	1007	762	726	674	546	460	354	250	192	138	84	
400	1000	-	-	-	1350	1157	876	821	766	606	511	389	252	178	128	79	
400	1500	-	-	-	1611	1377	1050	1028	935	710	575	432	248	117	88	59	
400	2000	-	-	-	1871	1595	1223	1218	1086	782	614	464	212	74	59	44	
400	3000	-	-	-	2459	2057	1658	1634	1315	871	654	426	201	42	38	34	
400	4000	-	-	-	3293	2547	2016	1961	1468	998	712	430	234	96	74	52	
400	5000	-	-	-	4276	3036	2351	2129	1828	1326	986	671	407	195	140	85	

Продолжение таблицы

P, кПа	G, кг/(м ² ·с)	X															
		-0,5	-0,4	-0,3	-0,2	-0,1	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	
500	50	-	-	932	660	410	309	220	190	181	173	148	127	127	94	62	
500	100	-	-	1067	772	514	334	326	326	326	308	291	275	239	169	99	
500	200	-	-	1166	874	645	467	456	441	385	349	311	291	258	182	106	
500	300	-	-	1265	981	785	610	596	564	447	392	331	307	278	195	113	
500	500	-	-	1396	1111	938	741	703	642	512	405	291	247	209	149	89	
500	750	-	-	1552	1267	1089	848	792	729	569	444	321	248	197	141	85	
500	1000	-	-	1709	1430	1249	959	886	821	628	482	352	244	179	129	79	
500	1500	-	-	2025	1705	1487	1137	1156	1021	703	523	392	244	130	97	63	
500	2000	-	-	2351	1982	1723	1322	1384	1181	763	556	420	173	71	57	43	
500	3000	-	-	3243	2621	2216	1840	1904	1412	827	590	362	186	42	38	34	
500	4000	-	-	4521	3491	2744	2171	2223	1564	1020	727	435	245	98	75	53	
500	5000	-	-	6060	4542	3249	2445	2186	1888	1345	997	677	412	195	140	85	
600	50	-	-	931	678	440	336	244	210	198	188	161	143	145	106	68	
600	100	-	-	1072	802	559	372	362	359	353	328	299	289	259	183	106	
600	200	-	-	1183	925	717	533	512	480	407	365	320	305	278	195	112	
600	300	-	-	1296	1054	886	707	675	611	465	404	340	321	296	207	118	
600	500	-	-	1436	1195	1053	855	788	709	534	419	320	270	230	155	92	
600	750	-	-	1595	1353	1205	967	883	784	586	456	324	249	203	145	87	
600	1000	-	-	1756	1518	1365	1082	981	860	638	492	352	242	180	130	80	
600	1500	-	-	2079	1808	1621	1272	1233	1054	683	495	369	233	139	103	66	
600	2000	-	-	2418	2104	1876	1451	1463	1211	733	513	391	174	72	58	44	
600	3000	-	-	3337	2770	2402	1952	1978	1442	803	559	356	195	47	41	35	
600	4000	-	-	4645	3644	2950	2309	2336	1615	1029	735	444	258	102	78	54	
600	5000	-	-	6216	4684	3388	2585	2344	1925	1347	1001	679	416	195	140	85	
700	50	-	-	931	695	470	363	268	230	216	203	174	159	162	118	74	
700	100	-	-	1076	832	604	411	399	391	380	347	307	302	280	0,8	0,9	
700	200	-	-	1200	975	789	600	569	520	430	381	328	319	297	118	74	
700	300	-	-	1327	1126	987	805	754	658	483	415	349	336	314	197	113	
700	500	-	-	1475	1279	1166	969	875	776	556	433	300	254	228	208	119	
700	750	-	-	1637	1440	1320	1086	975	840	603	468	327	249	208	219	124	
700	1000	-	-	1802	1606	1481	1206	1076	900	647	501	352	239	181	162	96	
700	1500	-	-	2133	1912	1755	1407	1311	1087	664	467	346	223	149	149	89	
700	2000	-	-	2486	2225	2029	1581	1542	1241	704	470	361	176	73	130	80	
700	3000	-	-	3430	2917	2590	2064	2052	1472	780	527	349	204	52	109	69	
700	4000	-	-	4769	3796	3157	2447	2450	1666	1038	744	453	271	105	58	44	
700	5000	-	-	6372	4825	3527	2725	2504	1963	1349	1005	682	420	195	44	37	
800	50	-	-	930	712	500	391	291	251	234	218	187	175	180	80	55	
800	100	-	-	1080	862	649	449	435	424	407	366	315	316	301	140	85	
800	200	-	-	1217	1026	860	667	626	560	453	397	337	333	317	130	80	
800	300	-	-	1358	1199	1088	903	833	706	501	427	358	350	332	211	120	
800	500	-	-	1514	1363	1280	1083	961	845	579	447	305	258	237	221	125	
800	750	-	-	1680	1526	1435	1205	1066	896	620	480	329	250	214	231	130	
800	1000	-	-	1847	1693	1596	1329	1173	940	657	511	352	236	182	168	99	
800	1500	-	-	2187	2015	1888	1542	1389	1121	644	440	323	212	158	153	91	
800	2000	-	-	2552	2347	2182	1711	1622	1272	675	428	332	177	74	131	80	
800	3000	-	-	3522	3065	2777	2176	2127	1502	757	495	343	214	56	115	72	
800	4000	-	-	4892	3947	3364	2586	2564	1717	1047	752	462	284	109	59	44	
800	5000	-	-	6527	4965	3666	2865	2665	2001	1351	1009	684	425	195	47	39	

Продолжение таблицы

P, кПа	G, кг/(м ² ·с)	X															
		-0,5	-0,4	-0,3	-0,2	-0,1	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	
1000	50	-	1072	929	746	561	446	339	292	269	248	214	207	216	154	92	
1000	100	-	1217	1088	921	740	526	508	489	461	405	331	343	343	239	134	
1000	200	-	1336	1249	1125	1004	801	740	640	499	428	354	361	356	248	139	
1000	300	-	1456	1417	1342	1288	1100	991	802	538	451	376	378	369	256	143	
1000	500	-	1614	1590	1531	1505	1313	1133	983	623	476	315	265	256	181	105	
1000	750	-	1792	1763	1699	1665	1446	1250	1009	653	505	335	251	226	160	95	
1000	1000	-	1971	1937	1868	1824	1578	1366	1020	675	530	352	230	183	132	81	
1000	1500	-	2363	2292	2220	2152	1814	1546	1190	605	384	277	189	177	128	79	
1000	2000	-	2904	2684	2589	2486	1973	1783	1334	617	342	272	179	75	60	45	
1000	3000	-	4416	3706	3359	3154	2403	2278	1564	712	431	329	233	66	54	42	
1000	4000	-	6226	5138	4249	3778	2864	2793	1822	1065	769	480	309	116	87	58	
1000	5000	-	8320	6837	5245	3941	3143	2991	2077	1355	1017	689	433	195	140	85	
2000	50	1120	1044	924	788	634	504	391	339	312	289	279	283	296	207	118	
2000	100	1256	1186	1083	964	819	594	575	558	529	487	442	428	395	273	151	
2000	200	1361	1312	1248	1167	1076	872	817	750	607	566	513	461	410	283	156	
2000	300	1465	1439	1421	1383	1353	1173	1079	957	689	648	589	495	424	292	161	
2000	500	1636	1615	1602	1571	1566	1463	1261	1125	782	724	579	429	352	244	137	
2000	750	1827	1797	1779	1742	1728	1606	1393	1161	823	734	565	401	314	219	125	
2000	1000	2022	1981	1957	1916	1890	1748	1525	1180	857	731	537	359	263	185	107	
2000	1500	2553	2385	2322	2273	2221	2010	1665	1314	842	556	378	240	210	150	90	
2000	2000	3388	2957	2715	2642	2547	2142	1814	1434	838	466	293	191	131	97	63	
2000	3000	5411	4600	3834	3428	3205	2511	2215	1623	782	457	336	248	81	64	47	
2000	4000	7486	6491	5449	4393	3827	2931	2699	1774	983	816	524	344	125	93	61	
2000	5000	9876	8630	7316	5615	4021	3235	2996	1955	1335	1050	718	457	195	140	85	
3000	50	1032	939	848	765	655	520	413	359	329	305	318	332	347	241	135	
3000	100	1160	1074	999	933	831	620	596	582	555	528	515	479	413	286	158	
3000	200	1270	1207	1167	1132	1074	889	836	802	674	656	633	531	434	299	164	
3000	300	1421	1382	1380	1379	1372	1135	1058	1006	775	771	738	570	442	304	167	
3000	500	1609	1592	1579	1566	1533	1385	1240	1131	925	839	710	557	419	288	160	
3000	750	1813	1798	1778	1758	1716	1566	1401	1211	1011	852	700	522	383	261	147	
3000	1000	2023	2053	2019	1986	1926	1741	1525	1286	1031	840	638	456	325	223	129	
3000	1500	2588	2530	2417	2342	2230	1961	1668	1371	1024	735	504	338	253	179	98	
3000	2000	3476	3360	3063	2844	2606	2186	1817	1443	992	632	393	263	185	132	80	
3000	3000	5610	4975	4291	3716	3185	2550	2087	1564	986	615	409	271	152	96	52	
3000	4000	7829	6962	5965	4850	3822	2948	2432	1719	1109	806	561	364	182	110	66	
3000	5000	1039	9287	8101	6258	4305	3265	2924	1819	1287	1073	744	478	200	143	87	
5000	50	945	873	811	753	675	544	446	390	357	331	339	352	247	174	102	
5000	100	1084	1015	961	910	835	646	618	606	590	554	539	529	462	318	174	
5000	200	1216	1154	1120	1089	1043	881	833	819	771	710	674	600	470	325	176	
5000	300	1364	1317	1311	1307	1297	1086	1017	985	835	786	746	629	485	333	181	
5000	500	1571	1577	1559	1542	1500	1367	1278	1178	1078	940	821	657	501	342	187	
5000	750	1811	1818	1788	1757	1699	1576	1431	1332	1159	1015	825	634	462	314	172	
5000	1000	2058	2117	2065	2013	1924	1754	1587	1421	1214	1005	773	552	396	268	149	
5000	1500	2679	2658	2513	2398	2234	1979	1732	1507	1221	903	614	424	313	224	134	
5000	2000	3634	3598	3259	2960	2619	2183	1848	1544	1133	743	468	318	237	171	114	
5000	3000	5857	5291	4588	3895	3177	2506	2046	1600	1073	678	440	301	187	118	57	
5000	4000	8113	7288	6265	5037	3776	2858	2326	1710	1146	820	591	388	205	123	72	
5000	5000	1063	9521	8325	6417	4173	3091	2802	1848	1286	1133	796	511	212	152	91	

Продолжение таблицы

P, кПа	G, кг/(м ² · с)	X															
		-0,5	-0,4	-0,3	-0,2	-0,1	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	
6000	50	980	914	855	800	728	585	482	419	382	355	304	257	249	176	103	
6000	100	1131	1064	1011	964	893	693	655	639	624	592	484	443	425	293	161	
6000	200	1279	1212	1176	1144	1098	934	877	858	824	767	647	589	515	353	192	
6000	300	1470	1402	1383	1370	1354	1163	1090	1071	1018	938	809	735	601	410	220	
6000	500	1734	1707	1663	1626	1567	1453	1324	1272	1160	1047	889	751	591	409	237	
6000	750	2055	2000	1929	1863	1783	1636	1506	1379	1252	1090	907	716	537	366	208	
6000	1000	2378	2361	2253	2144	2004	1824	1641	1483	1317	1089	844	615	440	296	162	
6000	1500	3138	3001	2777	2571	2320	2012	1794	1602	1314	991	676	461	336	238	163	
6000	2000	4260	4056	3625	3200	2675	2189	1852	1587	1220	793	492	339	250	180	124	
6000	3000	6573	5793	5010	4149	3204	2409	1951	1575	1085	680	437	302	197	129	66	
6000	4000	8635	7599	6497	5145	3685	2612	2094	1596	1091	780	550	370	208	130	82	
6000	5000	10591	9447	8118	6088	3908	2465	2273	1707	1148	1104	738	461	209	149	89	
8000	50	1158	1087	1026	973	901	651	547	497	467	442	382	329	318	222	126	
8000	100	1338	1259	1198	1151	1083	838	774	754	737	717	587	511	516	354	192	
8000	200	1524	1429	1372	1336	1285	1107	998	971	946	908	735	644	601	410	220	
8000	300	1761	1645	1590	1567	1537	1365	1214	1181	1151	1094	881	775	678	462	246	
8000	500	2090	1982	1892	1822	1757	1604	1477	1348	1245	1072	890	746	605	426	266	
8000	750	2483	2329	2198	2083	1962	1823	1612	1452	1279	1071	868	689	525	363	222	
8000	1000	2872	2755	2569	2378	2178	1933	1708	1511	1270	1029	775	564	398	267	155	
8000	1500	3769	3487	3162	2836	2441	2090	1793	1539	1256	900	603	399	272	181	81	
8000	2000	4994	4618	4089	3491	2806	2195	1829	1524	1132	726	436	285	195	133	70	
8000	3000	7246	6286	5443	4448	3207	2374	1859	1457	1024	608	379	257	168	111	66	
8000	4000	8833	7693	6621	5228	3656	2446	1846	1419	960	653	451	304	182	119	76	
8000	5000	9819	8812	7648	5825	3855	2055	1645	1376	925	766	540	339	178	129	79	
10000	50	1398	1325	1253	1193	1126	839	697	626	581	557	494	433	406	280	155	
10000	100	1612	1526	1445	1384	1319	1050	949	911	883	876	734	616	581	397	213	
10000	200	1830	1721	1623	1561	1522	1336	1160	1145	1091	1023	786	623	584	399	214	
10000	300	2108	1968	1848	1785	1774	1610	1356	1372	1292	1157	819	612	569	389	209	
10000	500	2488	2300	2157	2040	1912	1760	1516	1408	1226	1010	766	601	485	339	189	
10000	750	2939	2680	2482	2295	2124	1891	1677	1442	1207	927	703	535	401	278	157	
10000	1000	3383	3147	2876	2591	2288	2013	1709	1429	1137	822	594	421	297	200	112	
10000	1500	4355	3931	3502	3034	2519	2073	1724	1398	1033	682	454	304	200	135	71	
10000	2000	5607	5064	4439	3712	2839	2202	1721	1333	930	558	346	227	152	103	59	
10000	3000	7637	6545	5686	4573	3288	2319	1737	1270	841	499	315	219	144	99	63	
10000	4000	8671	7451	6478	5139	3516	2326	1646	1223	828	533	376	255	159	107	66	
10000	5000	8671	7812	6935	5475	3301	1873	1208	1198	890	608	476	295	158	115	72	
12000	50	1617	1545	1473	1403	1332	1055	856	756	698	678	608	543	499	342	186	
12000	100	1851	1769	1686	1601	1523	1266	1113	1046	1019	1032	882	664	581	397	213	
12000	200	2076	1972	1867	1772	1696	1495	1345	1292	1217	1089	841	652	543	373	201	
12000	300	2366	2233	2099	1990	1915	1704	1566	1533	1408	1124	772	621	490	336	183	
12000	500	2738	2514	2348	2179	1991	1724	1522	1324	1156	887	646	479	361	248	115	
12000	750	3187	2874	2640	2377	2089	1833	1522	1309	1042	766	542	392	281	192	99	
12000	1000	3625	3328	3000	2630	2226	1873	1565	1260	936	623	427	301	211	145	77	
12000	1500	4661	4107	3595	3027	2429	1974	1571	1197	823	498	329	228	160	111	70	
12000	2000	5833	5144	4473	3605	2770	2100	1627	1159	743	425	270	196	135	95	60	
12000	3000	7445	6318	5455	4356	3122	2279	1647	1137	700	410	277	195	134	94	61	
12000	4000	7824	6673	5835	4676	3256	2243	1568	1090	719	454	322	227	146	101	65	
12000	5000	6913	6264	5685	4746	2890	1771	1102	994	755	436	354	266	152	111	70	

Окончание таблицы

P, кПа	G, кг/(м ² ·с)	X														
		-0,5	-0,4	-0,3	-0,2	-0,1	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
14000	50	1760	1699	1638	1573	1510	1249	1003	867	772	718	664	608	515	353	191
14000	100	1988	1923	1858	1782	1706	1456	1245	1137	1032	959	769	620	512	351	190
14000	200	2170	2097	2024	1937	1857	1678	1456	1326	1084	934	719	577	456	314	172
14000	300	2413	2330	2245	2141	2054	1883	1656	1508	1120	889	651	518	387	268	149
14000	500	2652	2498	2367	2190	1956	1715	1429	1235	982	753	533	388	284	196	101
14000	750	3014	2788	2584	2319	1957	1647	1388	1116	892	636	447	305	221	152	89
14000	1000	3362	3175	2895	2475	2040	1675	1363	1073	782	509	335	238	171	121	73
14000	1500	4469	3889	3392	2794	2191	1764	1400	1045	699	410	261	190	141	102	67
14000	2000	5472	4746	4066	3249	2459	1950	1503	1069	680	376	244	174	128	92	59
14000	3000	6614	5544	4778	3724	2774	2109	1602	1101	690	421	271	191	130	92	61
14000	4000	6263	5420	4762	3855	2816	2116	1559	1086	725	477	326	218	139	96	63
14000	5000	4740	4245	4016	3587	2380	1800	1248	929	702	511	324	228	135	100	65
16000	50	1748	1694	1643	1589	1536	1356	1094	932	760	661	581	490	376	261	145
16000	100	1950	1889	1835	1773	1708	1547	1323	1185	966	851	648	529	409	283	156
16000	200	2074	1995	1934	1867	1790	1678	1496	1332	1049	835	603	482	389	269	149
16000	300	2254	2152	2079	2006	1912	1794	1663	1473	1125	808	549	427	362	251	141
16000	500	2408	2173	2056	1914	1708	1478	1284	1061	855	648	456	328	254	180	100
16000	750	2649	2354	2193	1965	1664	1392	1144	938	739	547	375	262	192	139	86
16000	1000	2879	2642	2407	2107	1692	1391	1135	874	658	434	285	196	148	108	68
16000	1500	3633	3188	2818	2326	1865	1496	1202	896	621	358	219	158	121	90	59
16000	2000	4181	3818	3345	2686	2111	1704	1366	1007	656	380	224	160	116	86	57
16000	3000	5184	4423	3829	3050	2357	1903	1510	1100	743	450	300	202	132	91	62
16000	4000	5067	4256	3753	3089	2350	1910	1513	1126	774	536	361	241	144	94	59
16000	5000	3896	3318	3242	2980	1918	1665	1307	1015	752	547	356	227	117	88	59
18000	50	1496	1452	1411	1369	1328	1207	969	820	695	644	561	449	363	252	141
18000	100	1607	1554	1506	1457	1401	1286	1046	909	780	746	611	492	425	293	162
18000	200	1582	1509	1447	1386	1306	1205	1027	901	767	686	544	436	387	268	149
18000	300	1548	1454	1379	1306	1202	1116	1004	888	750	622	474	377	345	240	135
18000	500	1405	1282	1199	1140	1033	914	845	731	659	515	369	257	223	159	94
18000	750	1549	1394	1279	1202	1090	913	814	689	584	431	300	209	174	126	78
18000	1000	1687	1502	1353	1258	1142	906	776	642	502	342	227	158	121	90	60
18000	1500	2326	2082	1810	1544	1364	1059	927	748	526	252	165	102	79	63	46
18000	2000	2874	2590	2275	1905	1600	1244	1139	941	650	308	196	135	105	80	55
18000	3000	3735	3356	2970	2356	1774	1471	1421	1095	771	485	400	284	128	95	62
18000	4000	3661	3126	2728	2152	1634	1559	1403	1120	830	574	501	385	157	115	72
18000	5000	3650	3100	2628	1900	1534	1500	1403	1220	930	674	581	450	200	135	102
20000	50	1135	1115	1103	1081	1008	908	803	750	590	468	390	333	275	193	111
20000	100	1259	1244	1240	1216	1097	967	842	806	620	471	398	381	352	244	137
20000	200	1143	1123	1118	1104	993	871	717	663	552	420	345	335	317	221	125
20000	300	1027	1001	995	991	889	776	593	523	483	369	293	290	282	198	114
20000	500	749	701	666	647	609	532	452	438	413	342	228	193	179	129	79
20000	750	823	758	699	653	589	514	458	457	403	308	206	153	130	97	63
20000	1000	887	806	726	657	570	496	462	473	393	276	185	117	86	67	48
20000	1500	1257	1139	1022	907	743	643	658	526	424	312	160	99	74	59	44
20000	2000	1536	1354	1191	1034	831	709	673	612	525	309	167	110	81	64	47
20000	3000	1649	1417	1269	1068	830	699	602	624	570	416	290	198	94	72	51
20000	4000	1532	1386	1243	1046	840	765	788	666	569	459	346	276	122	91	60
20000	5000	1657	1561	1370	1138	966	906	855	755	678	494	381	315	1366	100	65

$$Q_{\text{кр.яч}} = Q_{\text{таб}}(P, G, X, d_h = 9,36, s/d = 1,4) F_1(d_h) F_2(s/d) F_3(l_h) F_4(K_f),$$

где $Q_{\text{таб}}(P, G, X, d_h = 9,36 \text{ мм}, s/d = 1,4)$ — критический тепловой поток по таблице; $F_1(d_h) = (d_h/(d_h = 9,36))^{-1/3}$ — поправка на тепловой диаметр d_h макроячейки; $F_2(s/d) = 0,9 - 0,7 \exp[-35(s/d - 1)]$ при $s/d \leq 1,1$; $F_2(s/d) = 0,26 + 0,57(s/d)$ при $s/d > 1,1$, — поправка на относительный шаг расположения стержней s/d ; $F_3(l_h) = 0,95 + 0,6 \exp(-0,01 l_h/d_h)$ — поправка на длину обогрева для $40 < l_h/d_h < 300$.

Поправка, учитывающая влияние дистанционирующих решеток, принята по данным работы [3]:

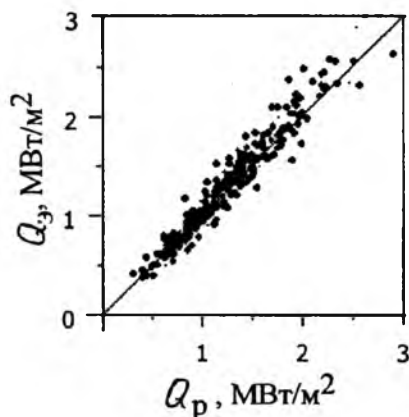
$$F_4(K_f) = 1 + 1,5 K_f^{0,5} (G/1000)^{0,2} \exp(-0,1 l_{\text{сп}}/d_h),$$

где $l_{\text{сп}}$ — расстояние от выходного сечения до ближайшего дистанционирующего устройства; K_f — коэффициент гидравлического сопротивления устройства.

2. Использование усредненных по сечению определяющих параметров. Опираясь на усредненные геометрические и режимные параметры на выходе из сборки, средний по критическому сечению критический тепловой поток определяем по формуле $Q_{\text{кр}}^{\text{ср}} = Q_{\text{таб}} F_1(d_h) F_2(l_h) F_3(s/d) F_4(K_f)$. $Q_{\text{таб}}$ находим по таблице для $d_h = 9,36 \text{ мм}$ и $s/d = 1,4$. Далее используем описанные поправки. Если необходимо, можно ввести также поправки на неравномерность обогрева (например, по работе [3] или другим работам).

С учетом поправочных функций оба метода используют для расчета критических тепловых потоков в пучках при условии: каналы с дистанционирующими решетками и без них, тепловой диаметр макроячеек от 2,8 до 21 мм, относительный шаг стержней от 1,02 до 1,52, давление от 0,1 до 20 МПа, массовая скорость от 50 до 5000 кг/(м²·с), локальное балансное паросодержание от -0,5 до 0,9, относительная длина обогрева l_h/d_h от 40 до 300.

На рисунке показано, как с помощью предложенного метода описывается критический тепловой поток в треугольных пучках (по выходным параметрам) (нанесена каждая восьмая из более чем 5000 точек обработанного массива). Со средней погрешностью по всем точкам, не превышающей 2%, среднеквадратичный разброс данных не превышает 17%. При обработке по входным параметрам эти оценки составляют 1 и 8% соответственно.



Описание критического теплового потока в треугольных пучках табличным методом (по выходным параметрам)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бобков В.П., Виноградов В.Н., Кириллов П.Л. Критический тепловой поток в треугольных пучках стержней (Скелетные таблицы, версия 1997 г.): Препринт ФЭИ-2603, 1998. 27 с.
2. Bobkov V.P., Kirillov P.L., Smogalev I.P., Vinogradov V.N. Look-Up Tables Developing Methods for Critical Heat Flux in Rod Bundles: Rep. for NURETH-8, 1997.
3. Groeneveld D., Joobier J., Leung L. e.a. The effect of fuel subchannel geometry on CHF. — In: Proc. NURETH-5, Salt Lake City, 1992, v. 3, p. 683—690.
4. Бобков В.П. Основные закономерности для кризиса в пучках стержней и других сложных каналах. — Труды 1-й Рос. конф. по теплообмену, 1994, т. 4, с. 32—37.
5. Бобков В.П., Виноградов М.Н., Зяткина О.А., Козина Н.В. Описание критического теплового потока в пучках стержней и других сложных каналах. — Труды Межд. конф. по теплофизическим аспектам безопасности, Обнинск, 1995, т. 1, с. 143—154.

6. Бобков В.П., Виноградов М.Н., Зятнина О.А., Козина Н.В. Метод описания кризиса в каналах сложного поперечного сечения. — Теплоэнергетика, 1995, № 3, с. 37—46.
7. Бобков В.П., Виноградов М.Н., Зятнина О.А., Козина Н.В. Относительное описание кризиса в сборках стержней и других сложных каналах. — Там же, 1997, № 3, с. 1—7.
8. Миронов Ю.В., Разина Н.С., Шпанский С.В. Пучок 2Б — программа для теплогидравлического анализа двухфазных потоков в стержневых сборках с учетом неомогенной структуры поперечного потока смешения. — В кн.: Теплофизические исследования для обеспечения безопасности ядерных реакторов водо-водяного типа, семинар ТФ-78, Будапешт, 1978, т. 2, с. 761—774.
9. Коштылек Я., Свитак Ф. Оценка моделей для поперечного массо- и энергообмена при анализе по ячейкам пучков тепловыделяющих стержней. — Там же, с. 775—790.

Поступила в Редакцию 23.04.99

УДК 539.12.043

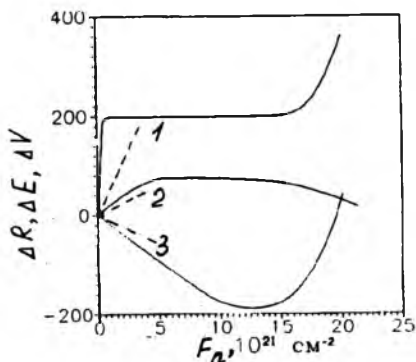
ВЛИЯНИЕ СОСТАВА ИЗЛУЧЕНИЯ НА РАДИАЦИОННУЮ ПОВРЕЖДАЕМОСТЬ ГРАФИТА

Николаенко В.А., Карпунин В.И., Кузнецов В.Н., Платонов П.А., Алексеев В.М., Чугунов О.К., Штромбах Я.И. (РНЦ «Курчатовский ин-т»), Балдин В.Д., Родченков Б.С., Смирнов Ю.И., Субботин А.В., Хандомиров Ю.Э. (НИКИЭТ), Лебедев И.Г. (ГНЦ РФ—НИИАР)

Настоящая работа посвящена определению критического флюенса нейтронов графита ГР-280 РБМК при учете влияния состава излучения (фактора состава излучения), представляющего отношение плотностей потоков нейтронного и γ -излучения.

Критическим принято считать флюенс нейтронов, при котором начинается интенсивная и необратимая деградация графита, в процессе которой материал почти полностью теряет присущие ему физические и механические свойства. На рис. 1 приведены графики изменения свойств графита в зависимости от флюенса нейтронов. Видно, что электросопротивление после резкого возрастания переходит к насыщению, но при достижении критического флюенса катастрофически увеличивается, при этом резко падает теплопроводность. Одновременно графит неограниченно распухает, стремится к минимуму модуль упругости и т.п.

Таким образом, критический флюенс нейтронов можно определять по изменению разных свойств графита, но обычно принято использовать для этого относительные изменения объема. Из рис. 1 видно, что по мере облучения графит сначала усаживается,



Р и с. 1. Зависимость электросопротивления (1), модуля упругости (2) и относительного объемного изменения (3) образцов графита от флюенса нейтронов при облучении в МР при 570 °С (—) и РБМК до флюенса нейтронов (3—4) 10^{21} см^{-2} (---)

что связано с закрытием технологических трещин, затем распухает. В момент, когда усадка компенсируется распуханием, начинается резкое увеличение объема, и флюенс нейтронов, при котором графит достигает этого состояния, был назван критическим. Эта величина в качестве меры предельного состояния графита используется в нормативных документах [1].

Следует отметить, и это очень важно, что критический флюенс нейтронов в экспериментах определяли при облучении графита в исследовательских реакторах, условия облучения в которых, естественно, отличаются от реальных в РБМК.

На рис. 2 приведена схема экспериментов по облучению графита для определения критическо-