

УДК 621.3.038.61

ПОВЕДЕНИЕ КРИОГЕННЫХ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ДАТЧИКОВ ТВО В МАГНИТНЫХ ПОЛЯХ

В.М.Микляев, А.К.Суханова, Ю.П.Филиппов, В.Г.Шабратов

Система измерения температур служит одной из основных систем криодиагностики сверхпроводящих магнитных установок, в частности, ускорителей заряженных частиц. В подобных системах в качестве датчиков температур уже используются и, видимо, будут применяться в дальнейшем отечественные резисторы ТВО, предложенные для этой цели в ЛВЭ ОИЯИ. Партия из восьми температурных датчиков ТВО различной чувствительности была испытана в магнитных полях до 9 Тл при температурах от 1,8 до 4,24 К. Представленные результаты свидетельствуют о противоречиях в имеющейся литературе по влиянию магнитных полей на показания ТВО, в частности, часть данных явно занижена. По результатам экспериментальных исследований представлены выводы о некоторых закономерностях для эквивалентных температурных сдвигов за счет магнитного поля и намечены пути систематизации полученных данных.

Работа выполнена в Лаборатории физики частиц ОИЯИ.

Behaviour of the TVO Temperature Sensors in the Magnetic Fields

V.M.Miklayev, A.K.Sukhanova, Yu.P.Filippov, V.G.Shabratov

A system to measure temperatures is one of the main cryodiagnostic systems of the superconducting installations such as particle accelerators, in particular. The TVO temperature sensors suggested for this aim at LHE, JINR, are already used and, perhaps, will be used in the future in these installations. A batch of eight TVO sensors of different sensitivity was tested in the magnetic field up to 9 T at the temperature range from 1.8 to 4.24 K. The presented results show that there are contradictions in the known references concerning influence of the magnetic field on the readings of the TVO sensors: in particular, some results are of significantly smaller values than indeed. The conclusions about law-governed nature regarding equivalent temperature shifts due to the magnetic fields are presented, and a way to fit the obtained data is outlined.

The investigation has been performed at the Laboratory of Particle Physics, JINR.

1. ВВЕДЕНИЕ

Многие сверхпроводящие приборы и установки, например ускорители частиц и их детекторы, работают в условиях низких температур и магнитных полей, и для контроля

температур необходимы датчики, которые помимо достаточной для практики точности отличаются стабильностью показаний в магнитных полях. В идеальном случае магнитное поле не должно влиять на показания датчика или может влиять настолько незначительно, что не имеет смысла вводить соответствующие поправки. К таким датчикам можно отнести емкостные, однако их стабильность оставляет желать лучшего. Можно использовать другой путь, когда вводится соответствующая поправка на изменение показаний датчиков в магнитном поле [2]. Одними из криогенных температурных датчиков, подходящих для работы в магнитных полях, служат углеродные термометры [1,2]. В частности, резисторы ТВО [1,3,4] используются в сверхпроводящем ускорителе нуклотрон [5], предполагалось их применение для проекта УНК, рассматривается их использование в проекте ЛНС [4]. Однако имеющиеся литературные данные о поведении датчиков ТВО в магнитном поле довольно противоречивы. Так, в [3] приводится информация о низком относительном температурном сдвиге $|\Delta T/T|$ для ТВО — не более 1% при индукции $B = 6$ Тл и температуре $T = 4,2$ К, тогда как в [1] показано, что для этих же параметров в перпендикулярном магнитном поле $|\Delta T/T| \approx 3\%$. Кроме того, в [3] отмечено отсутствие влияния ориентации магнитного поля на величину $\Delta T/T(B)$, а в [1] влияние ориентации на ΔT оценивается фактором 2, причем $\Delta T/T$ ниже для случая параллельного расположения датчика в магнитном поле. Наконец, неясно, каково влияние чувствительности dR/dT и индивидуальных особенностей на показания датчиков ТВО в магнитном поле.

Цель работы — провести дополнительные исследования температурного сдвига датчиков ТВО за счет магнитного поля с учетом отмеченных выше неопределенностей, сравнить полученные и имеющиеся данные и наметить пути систематизации результатов.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

2.1. Магнит. Для определения магнитосопротивления резистивных температурных датчиков $\Delta R = R(B, T) - R(B = 0, T)$, где R — сопротивление, был использован сверхпроводящий соленоид в вертикальном криостате. Этот соленоид состоит из двух коаксиальных секций с обмотками из сверхпроводящего кабеля ниобий–титан НТ-50 диаметром 0,2 мм и лавсановой изоляцией толщиной 0,05 мм. Длина кабеля в соленоиде — 13500 м, число витков — 28100. Размеры магнита: высота — 0,22 м, внутренний диаметр — 0,038 м, внешний диаметр — 0,27 м. Максимальное поле в центре соленоида около 9 Тл при 4,2 К и 11 Тл при 1,5 К. С пермендюрowymi наконечниками можно достичь значения магнитного поля 13 Тл при 1,5 К в зазоре около 2 мм. Соленоид запитывается от источника постоянного тока $U = 6$ В, $I = 70$ А. Интегратор стабилизатора тока обеспечивает плавный ввод-вывод тока в сверхпроводящий соленоид с регулируемой скоростью до 0,5 А/с. Для измерения магнитного поля используется датчик Холла LMK.

Измерительная часть установки изображена на рис. 1. В нее входят: подвижный держатель в виде стакана — 1, два пермендюрowych концентратора магнитного поля — 2, датчик Холла — 3, образцовый термометр — 5, текстолитовая пластина — 6, на которой размещаются исследуемые датчики — 4, соленоид — 7, измерительная система АК-6.30 — 8, компьютер — 9.

В экспериментах магнитное поле менялось в диапазоне от 0 до ~ 9 Тл, при этом температура жидкого гелия в объеме катушки соленоида поддерживалась постоянной с помощью системы, обеспечивающей постоянное давление насыщения криоагента. Изменяя

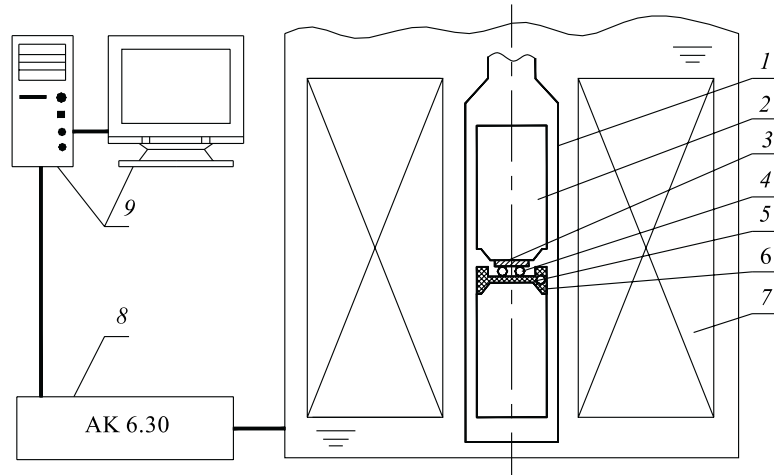
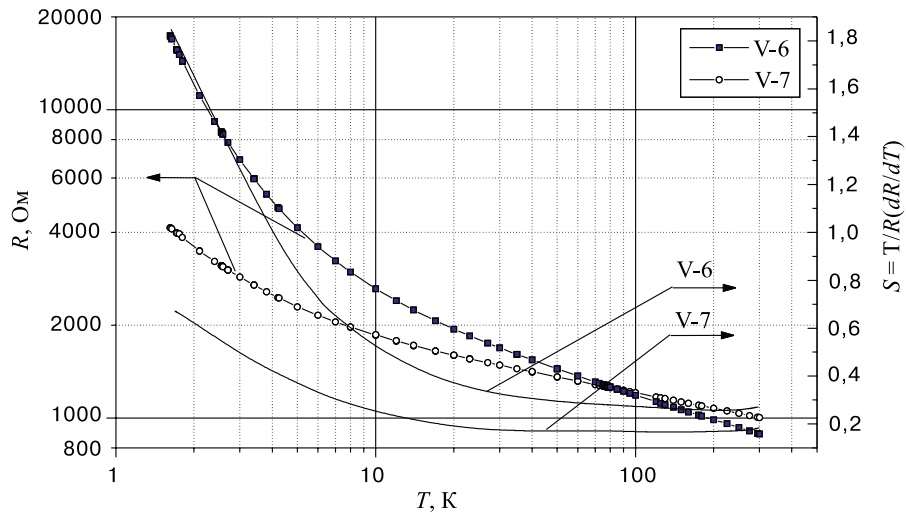


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

давление насыщения жидкого гелия, можно регулировать температуру внутри соленоида в диапазоне от $\sim 1,5$ до ~ 5 К.

2.2. Установка для калибровки датчиков. Перед проведением измерений в магнитном поле была осуществлена калибровка датчиков в отсутствие магнитного поля. Для измерения сопротивления резисторов применялась система АК-6.30 (ВНИИФТРИ), обеспечивающая возможность измерения сопротивления с относительной точностью 0,01 %. Система АК-63.0 использовалась в двух режимах: калибровка термометров в мини-криостате, где в качестве образцового термометра используется железородиевый термо-

Рис. 2. Зависимости сопротивления R и безразмерной чувствительности $S = T/R(dR/dT)$ датчиков ТВО V-6 и V-7 от температуры

метр RIRT-1 с погрешностью измерения ± 1 мК в диапазоне температур $1,5 \div 300$ К, а также измерение различных сопротивлений при смещающих токах от 1 мкА до 1 мА с инвертированием их величины.

Для проведения эксперимента были взяты восемь резисторов ТВО с различной чувствительностью. В качестве примера температурные зависимости для двух датчиков V-6 и V-7 с максимальной и минимальной чувствительностью представлены на рис. 2, из которого видно, что, например, при $T = 1,6$ К чувствительность датчика V-6 приблизительно в 3,5 раза выше по сравнению с датчиком V-7. На этом же рисунке приведены зависимости безразмерной чувствительности $S = T/R(dR/dT)$ от температуры.

Некоторые характеристики исследованных термодатчиков при $B = 0$ представлены в табл. 1.

Таблица 1. Характеристики термодатчиков ТВО при $B = 0$, $R(293 \text{ К}) \approx 900$ и 1000 Ом

Обозначение	$T = 1,8 \text{ К}$		$T = 2,08 \text{ К}$		$T = 4,24 \text{ К}$	
	R_0 , Ом	dR/dT , Ом/К	R_0 , Ом	dR/dT , Ом/К	R_0 , Ом	dR/dT , Ом/К
V-5	6826,4	-4282,7	5794,1	-3200,0	3138,3	-488
V-6	14245,4	-13888,9	11282,1	-8403,4	4789,2	-1046,6
V-7	3864,3	-1428,6	3522,7	-1036,8	2453,4	-238,1
V-8	4515,7	-1636,8	3994,9	-1386,0	2494,5	-296,4
D-6/5	4105,7	-1712,3	3706,1	-1242,2	2465,8	-262,5
D-4/4	6252,9	-4000,0	5342,1	-2659,6	2949,2	-437,8
D-5/7	4601,9	-2272,7	4071,4	-1562,5	2543,9	-307,7
D-9/5	9198,6	-7042,3	7531,1	-4761,9	3599,3	-653,6

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

3.1. Эквивалентный температурный сдвиг и влияние ориентации магнитного поля на него. Испытания в магнитных полях были проведены так, что датчики V-5, V-6, D-4/4 и D-6/5 ориентированы параллельно силовым линиям магнитного поля, а остальные датчики — V-7, V-8, D-5/7, D-9/5 — находились в перпендикулярном магнитном поле. Для оценки влияния ориентации магнитного поля первоначальные положения датчиков V-5, V-6, V-7 и V-8 в соленоиде поменяли на противоположные. В ходе эксперимента измеряли сопротивления $R(B, T)$ резисторов при следующих фиксированных значениях температур: 1,80, 2,08, 4,24 К, меняя индукцию магнитного поля.

Прежде всего представляется целесообразным проанализировать величины относительных эквивалентных температурных сдвигов $\Delta T/T$ для термометров с различной чувствительностью в параллельном магнитном поле, где их магнитосопротивление может быть минимальным [1], и сравнить полученные результаты с имеющимися данными. Эквивалентный температурный сдвиг определялся как $\Delta T = [R(B) - R(0)] \cdot dT/dR$, где dT/dR — производная при $B = 0$.

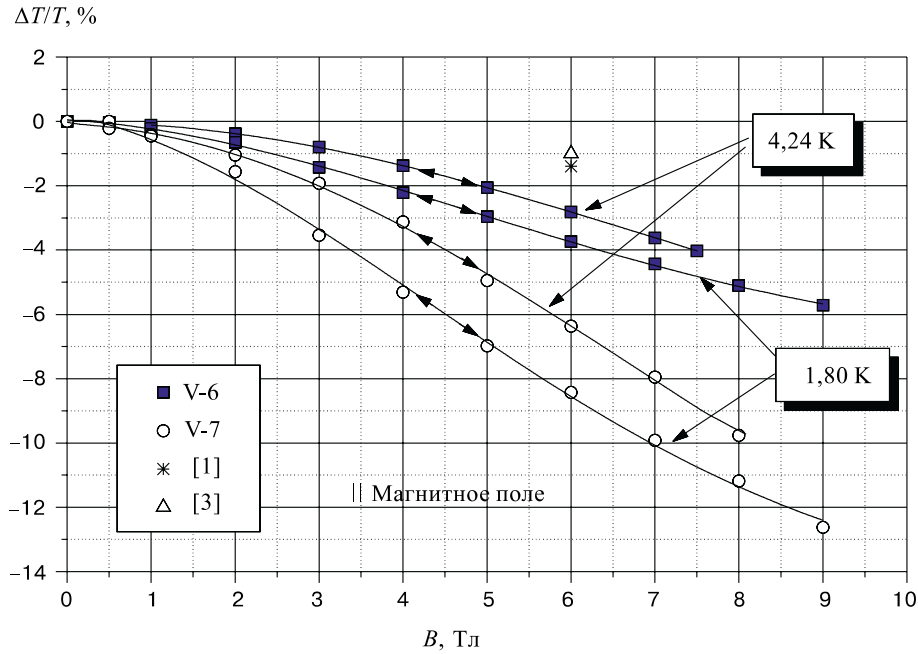


Рис. 3. Зависимости относительных температурных сдвигов $\Delta T/T$ датчиков ТВО V-6 и V-7 от индукции магнитного поля B

Зависимости $\Delta T/T$ от индукции магнитного поля для датчиков V-6 и V-7 с максимальной и минимальной чувствительностью при их параллельной ориентации представлены на рис. 3. Как и ожидалось, увеличение индукции B при постоянной температуре сопровождается увеличением магнитосопротивления ΔR и, соответственно, величины $\Delta T/T$. Так, например, при $T = 4,24$ К и $B = 6$ Тл относительный температурный сдвиг достигает значений около $-2,8$ и $-6,4\%$ для датчиков с максимальной и минимальной чувствительностью. Это значительно превышает известные данные [3] — около -1 и $-1,5\%$ [1]. Снижение температуры приводит к увеличению эквивалентных температурных сдвигов датчика. При этом величина $|\Delta T/T|$ не превышает $\sim 6\%$ для датчика V-6 при $T = 1,8$ К и $B = 9$ Тл, тогда как для V-7 при тех же T и B соответствующее значение $\Delta T/T$ достигает $-12,6\%$. Следует также отметить, что при увеличении и снижении магнитного поля при постоянной температуре соответствующие кривые практически не меняют своего положения, т.е. показания датчиков ТВО в магнитном поле воспроизводятся без гистерезиса.

Сопоставление полученных данных показало, что ориентация датчиков в магнитном поле практически не влияет на их эквивалентный температурный сдвиг. Так, для датчика V-6 при $T = 4,24$ К и $B = 6$ Тл расхождение для параллельного и перпендикулярного поля составляет 16 мК, а при $T = 1,80$ К и $B = 6$ Тл — всего 2 мК. Для менее чувствительного датчика V-7 соответствующие значения при $B = 6$ Тл не превышают 21 и 7 мК при $T = 4,24$ К и $T = 1,80$ К. Эти и другие результаты иллюстрирует рис. 4. Значения ΔT для высокочувствительного датчика V-6 при $T = 4,24$ К и $B = 6$ Тл очень

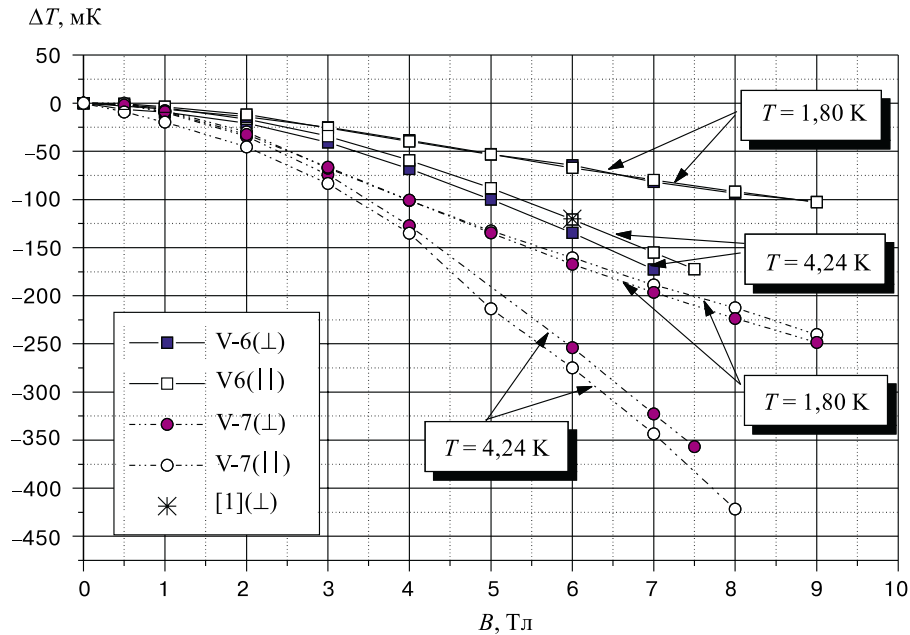


Рис. 4. Зависимости эквивалентного температурного сдвига ΔT от индукции магнитного поля для датчиков V-6 и V-7 при различной ориентации в магнитном поле

хорошо согласуются с аналогичными данными [1] для перпендикулярной ориентации — 120 мК.

3.2. Оценка индивидуальных особенностей датчиков ТВО в магнитном поле. Из табл. 1 и рис. 2 видно, что все датчики, будучи взятыми из одной и той же партии, имеют разные характеристики $R(T)$ и требуют индивидуальной калибровки. В связи с этим возникает вопрос: насколько поведение исследуемых датчиков ТВО подчиняется неким общим закономерностям, на основе которых можно оценить степень влияния магнитного поля на их показания с разумной для практического использования погрешностью? В принципе, относительный температурный сдвиг обратно пропорционален безразмерной чувствительности S при постоянных T и B : $\Delta T/T = (\Delta R/R)/S$, где $S = (T/R)(dR/dT)$, а $\Delta T = (\Delta R/R)T/S$. Степень отклонения экспериментальных данных от этой зависимости показана на рис. 5. Из этого рисунка видно, что, например, при $B = 3$ Тл, $B = 6$ Тл и $B = 9$ Тл максимальное отклонение большинства ($\sim 80\%$) точек от обратно пропорциональной зависимости не превышает $10 \div 20$ мК, что вполне приемлемо для практических оценок. Как показывает анализ, величину $\Delta R/R(B, T)$ можно определить с помощью функции Больцмана или показательной функции [6].

Таким образом, если оценена величина индукции магнитного поля в том месте, где установлен температурный датчик, известны его показания $R(B, T)$ и калибровочная характеристика $T = T(R, B = 0)$, то, пользуясь аналитическими соотношениями для $\Delta R/R(B, T)$, можно определить истинную температуру $T = T(R, B)$ итерационным методом.

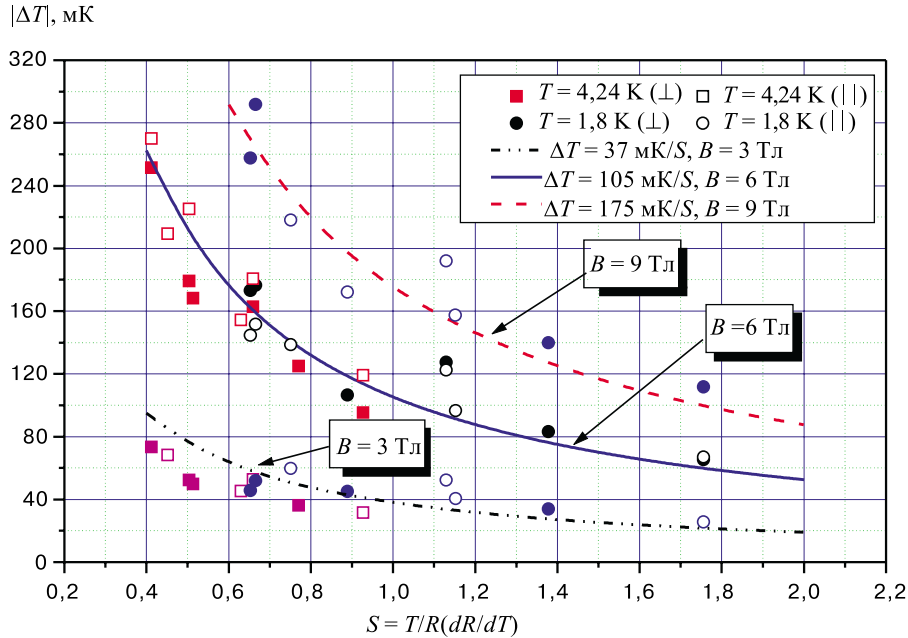


Рис. 5. Зависимость относительного температурного сдвига ΔT датчиков ТВО от их безразмерной чувствительности S

4. ВЫВОДЫ

Ориентация магнитного поля практически не влияет на величину эквивалентного температурного сдвига ΔT датчиков ТВО. Это отличается от результатов [1], где отмечено такое влияние, и согласуется с выводами [3]. Соответствующие расхождения ΔT для перпендикулярной и параллельной ориентации восьми датчиков в магнитном поле не превышают величин 8 мК при $T = 1,8$ К и 24 мК при $T = 4,24$ К.

Для датчиков ТВО относительный температурный сдвиг $\Delta T/T$ за счет магнитного поля достигает величин от $-2,8$ до $-6,4$ %, например для $T = 4,2$ К и $B = 6$ Тл, что значительно превышает известные данные [3] — 1 %. Нижний предел составляет $-2,8$ % для высокочувствительных датчиков, что хорошо согласуется с результатами [1] для $T = 4,2$ К, $B = 6$ Тл и перпендикулярной ориентации в магнитном поле. Вместе с тем эта величина ($\Delta T/T = -2,8$ %) превышает соответствующее значение [1] для параллельной ориентации в 2 раза.

Показания датчиков ТВО в магнитном поле воспроизводятся без гистерезиса при увеличении и снижении магнитного поля с точностью, определяемой использованной измерительной аппаратурой.

Для произвольно выбранных датчиков ТВО относительный температурный сдвиг $\Delta T/T$ за счет магнитного поля в диапазонах 1,8–4,2 К и до 9 Тл в первом приближении пропорционален относительному магнитосопротивлению $\Delta R/R$ и обратно пропорционален безразмерной чувствительности $S = (T/R)(dT/dR)$; при этом величины $\Delta R/R(B, T)$ могут определяться относительно простыми аналитическими выражениями.

Характерные значения: $|\Delta T/T| = 5,7 \div 13,9\%$ (1,8 К, 9 Тл); $|\Delta T/T| = 2,8 \div 6,4\%$ (4,2 К, 6 Тл); $|\Delta T/T| = 0,8 \div 1,7\%$ (4,2 К, 3 Тл).

Литература

1. Орлова М.П., Погорелова О.Ф., Улыбин С.А. — Низкотемпературная термометрия, М.: Энергоатомиздат, 1987.
2. Абилов Г.С., Ражба И.А. — В сб.: Научные труды ФНИИФТРИ «Метрологическое обеспечение теплофизических исследований при низких температурах», М., 1988.
3. Datskov V.I., Petrova L.V., Tsvineva G.P. — In: Proc. of the XVII International Conference on High Energy Accelerators. Dubna, 1998.
4. Balle Ch., Casas J., Rieubland J.M., Suraci A., Tognny F., Vauthier N. — In: Advance in Cryogenic Engineering, Plenum Press, New York, 2000, v.45 (to be published).
5. Baldin A.M., Agapov N.N., Belushkin V.A. et al. — In: Advances in Cryogenic Engineering, Plenum Press, New York, 1993, v.39A, p.501.
6. Filippov Yu.P., Sukhanova A.K. — EPAC 2000, Digest, Abstract SUK0398.