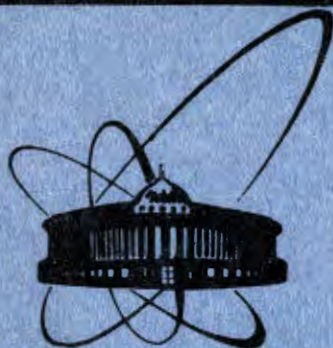


28/IV-84



ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА

2107/84

9-84-84

К. Деге

ИССЛЕДОВАНИЕ
ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ И ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИХ
ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ
АДГЕЗАТОРА КУТИ-20 ОИЯИ

Направлено на конференцию по аэрогидромеханике
Технического университета, Дрезден, сентябрь 1984 г.

1984

ВВЕДЕНИЕ

На протяжении ряда лет в Объединенном институте ядерных исследований разрабатывается коллективный ускоритель тяжелых ионов с электронными кольцами /КУТИ/, предложенный В.И.Векслером. Этот ускоритель способен ускорять ионы практически всех элементов при высоком темпе ускорения и может найти применение в различных областях фундаментальных и прикладных исследований, а также в народном хозяйстве.

Многие технические вопросы создания коллективного ускорителя были решены на прототипе КУТИ^{1/}. В настоящее время в связи с созданием КУТИ-20^{2/} проводятся исследовательские работы по повышению цикличности работы ускорителя до $f = 20$ Гц.

Одним из основных узлов КУТИ-20 является адгезатор, схема которого представлена на рис.1. 4 пары катушек /ступени сжатия/, расположенных симметрично относительно медианной плоскости, создают нарастающее во времени магнитное поле $t = 2$ мс, $B_{\text{макс}} = 2$ Т/ для формирования и сжатия электронного кольца. После загрузки ионами двухкомпонентный пучок выводится из медианной плоскости и ускоряется в спадающем по длине поле секции предварительного ускорения, состоящей из двух соленоидов.

Цикличность работы прототипа КУТИ составляет 0,5 Гц. С ее повышением на КУТИ-20 до $20 \div 50$ Гц тепловая мощность, выделяющаяся в катушках и цельнометаллической титановой камере, возрастает в $50 \div 100$ раз и достигает значительной величины. Поэтому необходимо применять интенсивное охлаждение^{3/}. При работе магнитной системы также возникают большие механические нагрузки на узлы адгезатора вследствие действия пондеромоторных сил и атмосферного давления на стенку камеры. Для решения всего комплекса технических /съем тепла, энергообеспечение, измерение/ проблем требуется постоянное сотрудничество различных специалистов. В нем принимают участие специалисты ОНМУ ОИЯИ и секций "Электротехника", "Преобразование энергии" и "Основы машиностроения" Технического университета г. Дрездена.

В настоящей работе приведен обзор гидродинамических и теплотехнических исследований, направленных на создание системы охлаждения адгезатора.

1. ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОХЛАЖДЕНИЯ КАМЕРЫ И КАТУШЕК IV СТУПЕНИ СЖАТИЯ

Камера /1/ адгезатора /рис.1/ изготовлена из титанового сплава ОТ4-1 толщиной 0,8 мм и укреплена в блоке жесткости /2/. Катушки установлены на стапеле /3/. Блок жесткости и стапель обеспечивают требуемую точность установки магнитной системы и камеры. Катушки I ÷ III ступеней сжатия выполнены из медной шины квадратного сечения с отверстием для потока охлаждающей жидкости. IV ступень и соленоиды V, VI намотаны многожильным проводом. В них для охлаждения и изоляции используется проточное трансформаторное масло.

Измерение вызванных вихревыми токами потерь энергии в стенках камеры проводилось двумя независимыми способами /калориметрия и измерение температуры стенки/. Распределения температуры и тепловой мощности по контуру камеры имеют резко выраженные максимумы на радиусе катушек IV ступени. Суммарная тепловая

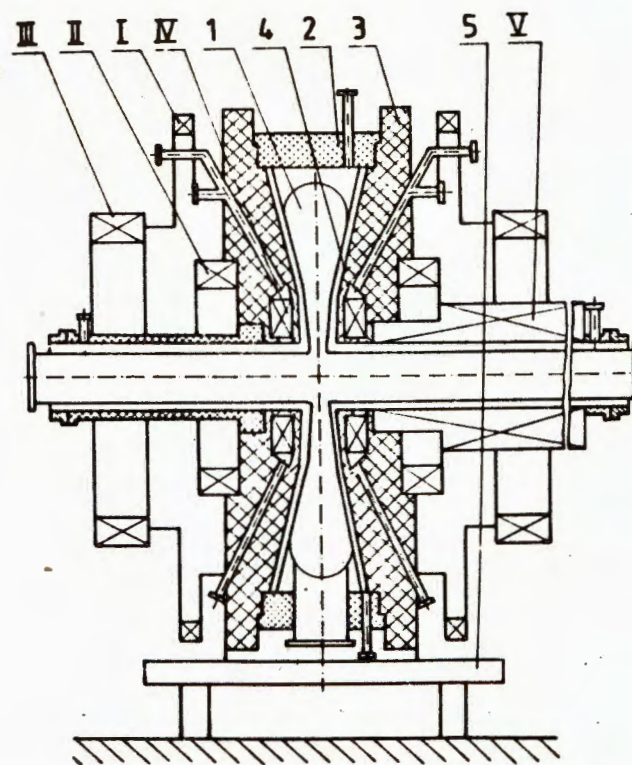


Рис.1. Схема адгезатора /пояснения в тексте/.

мощность, выделяемая в камере при частоте $f = 20$ Гц, составляет 100 кВт. Для оценки эффективности охлаждения камеры трансформаторным маслом была проведена серия экспериментов. Масло прокачивалось в зазоре между ступелем и стенкой камеры /4 рис.1/. Распределение по азимуту потока ламинарно текущего масла было достаточно равномерным. Без принудительного охлаждения масла во внешнем контуре максимальная температура стенок камеры достигала 205°C при выделяемой мощности 59 кВт и слабо зависела от протока. Эта температура существенно превышает допустимую $/100^{\circ}\text{C}/$. Зависимость локального давления в зазоре между стенкой камеры и ступелем от ширины зазора в данных экспериментах не фиксировалась. Этот недостаток первой серии измерений можно было устранить только при моделировании всех процессов на макете. Макетные исследования позволили получить данные по оптимальной ширине зазора и применению устройств, интенсифицирующих теплообмен /см. раздел 2/.

В первом варианте катушек IV ступени сжатия /рис.2а/ между рядами витков располагались профилированные диски /1/, изготовленные из электроизоляционного материала. Пазы в дисках сделаны так, что масло вначале проходило 60% внешнего кольцевого пространства /3/ через зазоры /5/ между витками /2/ и дисками, попадало во внутреннее кольцевое пространство /4/, затем на оставшейся части окружности через зазоры возвращалось к внешнему диаметру. Витки катушек IV ступени были обмотаны изолирующей лентой и уложены без радиальных зазоров /рис.2б/.

При макетных испытаниях применение метода смывания краски /4/ показало достаточно равномерный теплообмен по окружности катушки. При тепловых испытаниях нагрев катушек осуществлялся эквивалентным постоянным электрическим током и контролировался 25-ю термодатчиками. Трансформаторное масло с помощью струйного насоса прокачивалось через катушку и охлаждалось в теплообменниках. Эксперименты показали, что при протоке масла $\dot{V} = 38,3$ л/мин и его входной температуре $\theta_{\text{вх}} = 20^{\circ}\text{C}$ от катушки можно было отвести не более 17 кВт тепловой мощности /максимальная температура проводника $80^{\circ}\text{C}/$. При цикличности ускорителя $f = 20$ Гц в рабочем режиме в катушке IV ступени выделяется 29 кВт. Отвод такой мощности потребовал как конструктивной переработки катушки, так и исследований теплопередачи в новой конструкции /рис.2в/. В этом варианте межвитковые зазоры обеспечиваются периодически расположенными мостиками. Таким образом поверхность теплосъема существенно возрастает по сравнению с конструкцией с дисками /рис.2б/. Принципиально теплопередачу можно еще улучшить, если с помощью изменяющейся по радиусу ширины зазоров осуществить более однородный проток масла в осевом и радиальном направлениях.

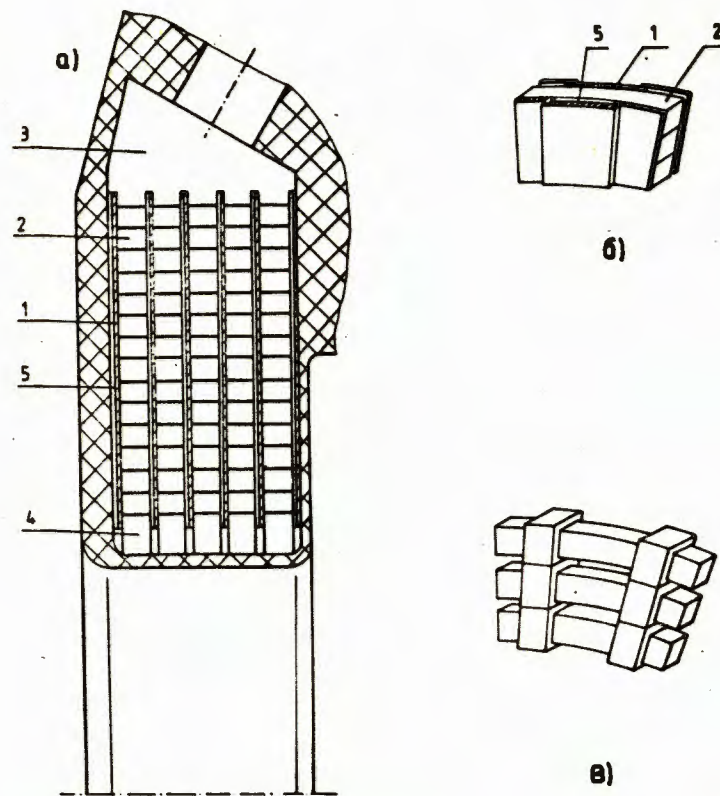


Рис.2. Катушка IV ступени сжатия: а/ катушка с дисками, б/ каналы охлаждения катушки с дисками, в/ каналы охлаждения катушки с мостиками /пояснения в тексте/.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И МАКЕТНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОХЛАЖДЕНИЯ КАМЕРЫ И НОВОГО ВАРИАНТА КАТУШЕК IV СТУПЕНИ

При теоретическом рассмотрении процессов течения и теплообмена вблизи стенок камеры и в катушках IV ступени применялись два метода. Первый основывался на решении дифференциальных уравнений движения, неразрывности и сохранения энергии для ламинарного течения жидкости с большой вязкостью с учетом изменяющихся свойств жидкости вдоль радиального зазора с нагретыми стенками и диссипативных процессов /термо-вязкостная связь/. Образующаяся система уравнений с использованием алгоритма /5/ решалась численно на ЭВМ. Программа позволяла для различных начальных распределений скоростей и направлений течения масла рассчитывать распределения скоростей, температуры и давления по длине зазора /6/.

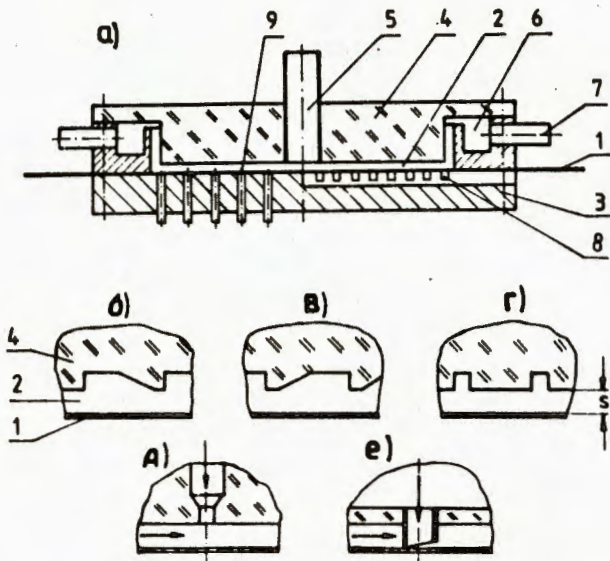


Рис.3. Макет радиального зазора и устройства для интенсификации теплообмена /пояснения в тексте/.

Второй метод заключался в использовании для радиального зазора полуэмпирических уравнений, полученных ранее^{7/} для расчета теплопередачи в трубе с равномерно распределенной по длине тепловой нагрузкой и ламинарно текущей жидкостью. Уравнения корректировались в процессе макетных исследований. При исследовании таким методом охлаждения камеры, где плотность теплового потока сильно изменяется с радиусом, лучше использовать уравнения для параметров, усредненных по длине зазора.

Для подтверждения пригодности этих полуэмпирических уравнений и полукачественных исследований эффективности различных устройств, предназначенных для интенсификации теплообмена, использовался макет радиального зазора /рис.3/. Титановая пластинка /1/ равномерно нагревалась постоянным электрическим током. Приклеенное к ней диэлектрическое дно /3/ придавало пластинке жесткость и обеспечивало надежную теплоизоляцию. Центральное отверстие /5/ в крышке из оргстекла /4/ и кольцевая камера /6/ с четырьмя выходами /7/ гарантировали азимутально равномерное течение масла в зазоре /2/. Для измерения распределения давления использовали отверстия /9/ в дне. Температура измерялась при помощи полупроводниковых термодатчиков /8/. Ширина зазора измерялась с помощью свинцовых спиралей, которые при сжатии принимали размер зазора.

Большое количество опытов на этом макете с различными комбинациями параметров позволили определить корректирующие факторы

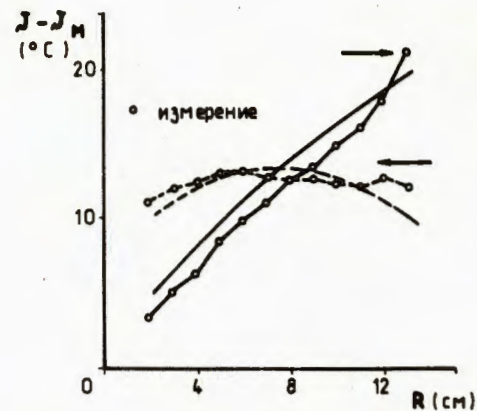


Рис.4. Расчетная и измеренная температура титановых стенок для различных направлений течения масла.

коэффициентов уравнений. Эти факторы мало отличаются от единицы и практически одинаковы для центробежного и центростремительного течений.

Исследования по интенсификации теплообмена показали, что кольцевые канавки /рис.3г/, подобные имеющимся в катушках IV ступени, вихревые генераторы, спиральные направляющие и кольцевые генераторы /рис.3б и 3в/ на оргстеклянной крышке не приводят к существенному увеличению теплосъема с титановой пластинки. Интенсификация теплопередачи осуществляется только при непосредственном воздействии /рис.3д и 3е/ на пограничный слой. В этом случае получено снижение разности температур $\Delta\theta = \theta_{\text{макс}} - \theta_{\text{масло}}$ примерно вдвое при том же объемном расходе масла. В настоящее время проводятся работы по оптимизации активного воздействия на течение жидкости в пограничном слое.

Эксперименты и расчеты по полуэмпирическим уравнениям показали, что распределения температур в радиальном зазоре существенно /рис.4/ зависят от направления течения масла.

Общий перепад давления в радиальном зазоре можно приблизительно рассчитать, используя соответствующие выражения для ламинарного течения жидкости в плоском зазоре. Однако при этом требуется учет направления течения масла и распределения температур. В противном случае ошибка расчета достаточно велика.

Для окончательного решения вопроса о правильности выбора конструкции новых катушек IV ступени сжатия /рис.2в/, тепловой режим которых рассчитан по полуэмпирическим уравнениям, был изготовлен макет катушки с количеством витков 4x4. Исследования макета производились в условиях, аналогичных испытаниям предшествующего варианта катушек /рис.2а и б/. Измерения показали, что измеренные и расчетные значения температур проводника совпадают при условии учета в расчете процесса теплопередачи всей поверхности проводника, находящейся вне мостиков. Температура проводника внутри мостика превышает наружную незначительно.

В реальной конструкции катушек IV ступени для распределения и сбора охлаждающей жидкости предусмотрено сравнительно ограниченное сечение. В связи с этим возникли опасения неравномерности потока масла по зазорам. Для исследования этого вопроса был изготовлен из оргстекла полномасштабный гидродинамический макет катушки с точностью не хуже $\pm 0,1$ мм, повторяющий геометрию

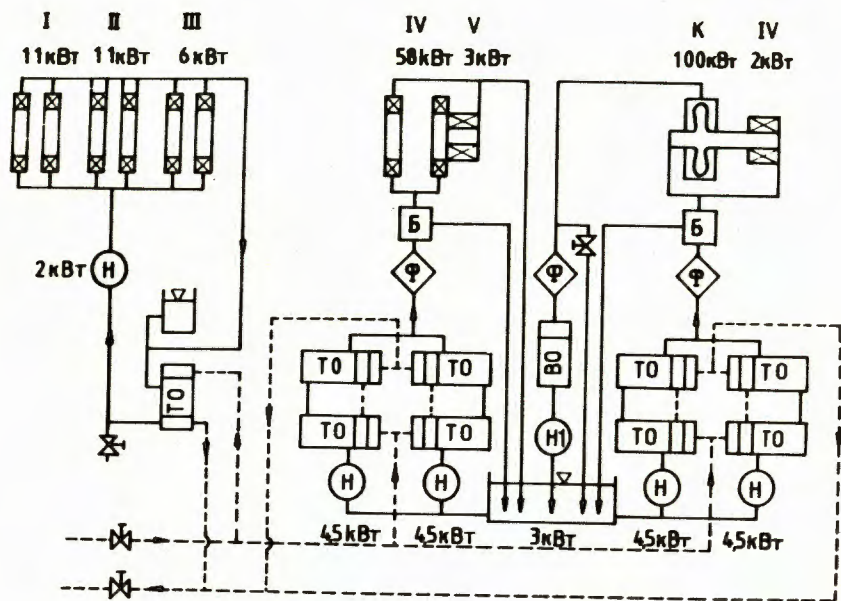


Рис.5. Система охлаждения. Н - насос, Н1 - форвакуумный насос, ТО - теплообменник, Ф - фильтр, Б - байпасное устройство, Д - демпфирующий объем, К - камера, I-VI - катушки. Теплопотоки соответствуют цикличности 20 Гц.

зазоров. Исследования показали, что направление течения масла от внешнего диаметра к внутреннему является более предпочтительным, так как при этом распределение температуры более равномерно. Распределение скоростей измерялось с помощью трубки Пито. Было показано, что течение жидкости достаточно равномерно как в радиальном, так и в аксиальном направлениях.

В целом экспериментальные результаты аналогичны полученным в [9], однако относятся к неисследованному ранее диапазону параметров.

Тепловая мощность, выделяемая в соленоидах /V, VI рис.5/, сравнительно невелика. Техническая проблема состоит в необходимости гарантии равномерного обтекания всех витков охлаждающей жидкостью с целью исключения локального перегрева.

Охлаждение катушек I-III ступеней сжатия, намотанных полным проводником, не представляет особых трудностей из-за относительно небольших тепловых потоков / ~ 5 кВт/. Теплопередачу и падение давления в изогнутых трубках можно с достаточной точностью вычислить [7].

3. СИСТЕМА ОХЛАЖДЕНИЯ АДГЕЗАТОРА

При проектировании системы охлаждения /рис.5/, кроме требования отвода необходимой тепловой мощности, расположение других узлов ускорителя диктовало условия малых габаритов системы и ограничивало объем используемого трансформаторного масла /600 л/. Кроме того, использование при конструировании функционально-узлового принципа позволяет расширять систему.

Охлаждение происходит в трех контурах - водяном /I-III катушки/ и двух масляных /камера и IV-VI катушки/.

Байпасное устройство и демпфирующий объем защищают камеру и катушки от превышения номинального давления и ударных нагрузок. Суммарная мощность, которую необходимо отвести от элементов адгезатора КУТИ-20 при частоте повторений импульсов 20 Гц, составляет 214 кВт.

Характеристики применяемых насосов, теплообменников, байпасных устройств позволяют ожидать устойчивой работы всей системы.

4. ВЫВОДЫ

В связи с большими тепловыми потоками в катушках IV ступени сжатия и камере и необходимостью эффективного охлаждения проведен большой объем расчетов и экспериментов, накоплена значительная информация. Показано, что необычные рабочие условия и сложное устройство систем адгезатора требуют моделирования основных процессов. При цикличности работы ускорителя $f = 20$ Гц можно ожидать достаточного охлаждения катушек магнитов системы. В настоящее время проводятся исследования по повышению эффективности охлаждения камеры с помощью влияния на пограничный слой.

Автор признателен А.С.Щеулину за полезные дискуссии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Haller R., Zschornack G. Der Dubnaer Schwerionen-Kollektivbeschleuniger - Entwicklung und Perspektiven. Kernenergie, 1979. Bd. 24, Heft 5, S.179-182.
2. Саранцев В.П., Перельштейн Э.А. Коллективное ускорение ионов электронными кольцами. Атомиздат. М., 1979.
3. Беляев Л.Н. и др. ОИЯИ, 9-80-577, Дубна, 1980.
4. Беляев Л.Н. и др. ОИЯИ, 9-81-6422, Дубна, 1981.
5. Piesche M., Felsch K.O. Über drallbehaftete Strömung und Wärmeübergang im Radialdiffusor. Mitt. d. Inst.f.Strömungslehre und Strömungsmaschinen der Universität Karlsruhe, 1981, Nr. 29.

6. Hiller S. Berechnung der Geschwindigkeits - und Druckverteilung in einem laminar durchströmten Radialspalt. Unveröff. Diplomarbeit, TU Dresden, Sektion 12, Bereich Strömungstechnik, 1983.
7. Петухов Б.С. Теплообмен и сопротивление при ламинарном течении жидкости в трубах. "Энергия", М., 1967.
8. Döge K. Hochdruckaxialventilatoren mit Grenzschichtbeeinflussung, Diss. B, TU Dresden, 1981.
9. Reichhard H., Tollmien W. Die Verteilung der Durchflußmenge in einem ebenen Verzweigungssystem. Mitt. aus dem Max-Planck-Institut für Strömungsforschung, Göttingen, 1952, No 7.

Рукопись поступила в издательский отдел
10 февраля 1984 года.

Дёге К.

9-84-84

Исследование гидродинамических и теплотехнических характеристик системы охлаждения адгезатора КУТИ-20 ОИЯИ

Рассматриваются вопросы эффективного охлаждения вакуумной камеры и магнитообразующих катушек. Определено распределение выделяемой мощности в стенках камеры, проведен расчет параметров теплообмена и течения охлаждающей жидкости в радиальных зазорах, образуемых стенкой камеры и ступенем, а также рядами витков в катушке. Найден способ интенсификации теплообмена путем управления течением пограничного слоя жидкости. В результате расчетных работ и макетных испытаний показано, что конструкция адгезатора и внешней системы охлаждения позволяет обеспечить надежную работу при частоте повторения импульсов $f = 20$ Гц.

Работа выполнена в Отделе новых методов ускорения ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1984

Перевод О.С.Виноградовой

Doege K.

9-84-84

Investigation of Hydraulic and Thermic Parameters of the JINR KUTI-20 Adhesator Coding System

Problems of effective cooling of vacuum chamber and of magnetoforming coils are considered. Distribution of released power in the walls of vacuum chamber, calculation of heat transfer and cooling liquid flow in radial slots formed by the chamber wall and within the coils are given. The way of intensification of heat transfer with boundary layer control methods is found. Theoretical and experimental investigations allow to draw a conclusion as to the efficiency of the adhesator and cooling system arrangement up to 20 Hz repetition frequency.

The investigation has been performed at the Department of New Methods and Acceleration, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1984