

УДК 621.313.33:538.4:621.362

Э. З. Аснович, Е. П. Карелин, А. А. Ринейский, И. М. Толмач,
А. М. Тучинский, А. И. Элькин

О СОЗДАНИИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ИНДУКЦИОННЫХ НАСОСОВ БОЛЬШОЙ ПОДАЧИ

В настоящее время признано, что атомные реакторы-размножители на быстрых нейтронах, использующие в качестве теплоносителя жидкий натрий, смогут занять устойчивое место в общей совокупности различных источников энергии. В частности, в Советском Союзе накоплен положительный опыт работы экспериментальных реакторов такого типа [1], пущена АЭС с реактором БН-350 в г. Шевченко [2] и ведется монтаж реактора БН-600 на Белоярской АЭС [3].

На вспомогательных системах названных агрегатов (заполнение бака натрием, слив, циркуляция теплоносителя в системах очистки и приготовления и др.) уже широко применяются электромагнитные насосы средней мощности [4]. Разработки этих насосов были выполнены коллективом специалистов НИИЭФА им. Д. В. Ефремова под руководством В. А. Глухих. Как известно, такие насосы обладают определенными преимуществами перед механическими. К числу этих преимуществ относятся отсутствие вращающихся частей и уплотнений, полная герметичность, простота регулирования подачи по амплитуде питающего напряжения, отсутствие смазки и сложности обслуживания, отсутствие ограничений по расположению в контуре.

В качестве же главных насосов I и II контуров реакторов БН-350, БН-600 с подачей натрия до $9700 \text{ м}^3/\text{час}$ и давлениями до $8,7 \text{ кгс/см}^2$ применены механические агрегаты с насосами центробежного типа и приводным электродвигателем. Масса одного агрегата на указанные параметры составляет 114 тонн при высоте конструкции 14 м.

Созданию эффективных мощных механических насосов с подачей до 10 тыс. $\text{м}^3/\text{час}$ предшествовала многолетняя работа ряда предприятий, завершившаяся успешным решением сложных проблем. Накопленный опыт работы таких насосов весьма положителен. Проработки, выполненные у нас в стране и за рубежом, показывают, что в принципе возможно создание механических насосов с подачей $20 \div 30$ тыс. $\text{м}^3/\text{час}$ и выше.

Однако для столь больших значений подачи габариты и масса механических насосов существенно возрастают, что вызывает определенные трудности при их изготовлении и испытании. Кроме того, усложняются вопросы регулирования подачи и возникает необходимость отказа от некоторых вспомогательных систем.

Поэтому предпринимаемая здесь попытка проанализировать другое возможное решение задачи, основанное на применении электромагнитных насосов, представляется оправданной.

Этот вопрос уже рассматривался ранее в работе [5].

При такой разработке должен быть выполнен ряд условий и требований (общих как для механических, так и электромагнитных насосов). Отметим основные из них:

1. Большие подачи натрия ($20\,000 \text{ м}^3/\text{час}$ и более для одного насоса) при давлениях $5\text{—}8 \text{ кгс/см}^2$. В одном энергоблоке устанавливается по

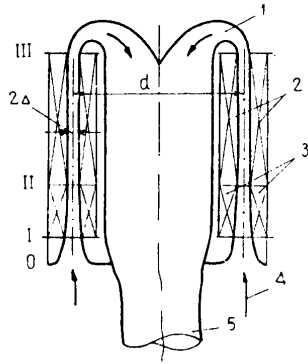


Рис. 1. Схема насоса (насос целиком погружен в натрий): 1 — диффузор с поворотом потока; 2 — основные обмотки; 3 — обмотки в зоне активного конфузора; 4 — всасывание из ванны; 5 — напорный трубопровод.

3—4 таких насоса в каждом из контуров. Для перекачивания столь больших количеств жидкого металла целесообразно применение схемы цилиндрического индукционного насоса. При этом при определенных условиях может стать актуальной проблема устойчивости течения по кольцевой щели насоса (предотвращение появления языков и провалов осевой скорости) [6].

2. Обеспечение работоспособности при избыточном давлении на всасывающей стороне насоса I контура не более $0,2 \div 0,5 \text{ кгс/см}^2$ (повышение этой величины ограничено допустимыми давлениями в баке реактора). Учитывая, что рабочие скорости в канале электромагнитного насоса достигают $15 \div 20 \text{ м/сек}$, должны быть приняты специальные меры, исключающие возникновение кавитации во входном конфузоре. Для насоса II контура это требование отсутствует.

3. Наличие радиации на насос — около 10^6 нейтр/сек (интегральный поток за 20 лет — около $0,6 \cdot 10^{15} \text{ нейтр/см}^2$).

4. Температура натрия в насосе, установленном на холодной ветви, составляет $300 \div 400^\circ \text{C}$, рабочая же температура активных электротехнических материалов будет на $50 \div 100^\circ \text{C}$ выше. В случае отсутствия принудительного охлаждения это потребует применения специальных высокотемпературных материалов.

5. Обеспечение режима расхолаживания. В частности, спустя $1,5 \div 2 \text{ сек}$ после исчезновения сетевого напряжения подача не должна снизиться более чем на $10 \div 15\%$, а через 1 мин составлять около 5% начального значения. При кратковременном (менее $1,5 \text{ сек}$) снижении напряжения с последующим его восстановлением должно произойти восстановление нормальной работы насосов без их отключения. При выходе из строя одного из насосов его напорный тракт перекрывается обратным клапаном, а оставшиеся агрегаты должны изменить рабочий режим так, чтобы не произошло существенного снижения общей подачи через реактор.

6. Обеспечение к. п. д. насоса на уровне не ниже 50% в целях уменьшения потерь электроэнергии.

Результатирующим критерием при сравнительной оценке вариантов электромагнитного и механического насосов является результат технико-экономического анализа, выявляющий экономический и технический эффект.

В выполненной проработке возможных вариантов индукционных цилиндрических насосов I и II контуров реактора мощностью 1500 Мвт намечены некоторые решения перечисленных задач.

Схема насоса показана на рис. 1. Весь насос I контура целиком погружен в натриевую ванну реактора. Забор натрия из ванны осуществляется в нижней части насоса, затем жидкий металл движется вверх, проходя активную зону между двумя индукторами, и поворачивает в диффузоре вниз в центральный напорный трубопровод. Заданными являются подача, давление, параметры рабочего тела. При расчете параметров насосов учитывалось влияние на их энергопоказатели продольного краевого эффекта на основе работ [7] и [8], неоднородности профиля скорости по глубине [9], трения, потерь в оболочке, свойств обмотки бегущего поля.

Основываясь на названных работах, была получена следующая расчетная формула к.п.д. активной зоны насоса (участок II—III, рис. 1):

$$\eta_a = \frac{[k_l s / (1-s) - C_0](1-s)^2}{(1-s^2) C_l + s k_l + s^2(1-k_l) + \sigma_1 \Delta_1 / \sigma \Delta} \times \\ \times \frac{1}{1 + \lambda_0 \rho p Q^3 / [32 \pi^2 (p_2 - p_1) d^3 \Delta^4 \omega (1-s)]} \quad (1)$$

Мощность, забираемая из сети активной зоной насоса:

$$P_c = \frac{P_r}{\eta_a} = \left[Q(p_2 - p_1) + \frac{\lambda_0 \rho p Q^4}{32 \pi^2 d^3 \Delta^4 \omega (1-s)} \right] \times \\ \times \frac{C_l + \frac{s^2(1-k_l) + s k_l + \sigma_1 \Delta_1 / \sigma \Delta}{(1-s)^2}}{k_l \frac{s}{1-s} - C_0} \quad (2)$$

Здесь s — скольжение; C_0 — коэффициент, характеризующий влияние неоднородности скорости по глубине [9]; λ_0 — коэффициент трения без учета влияния магнитного поля; ρ — плотность; p — число пар полюсов; d — средний диаметр камеры насоса; Δ — полутолщина слоя жидкого металла; $\sigma_1 \Delta_1 / \sigma \Delta$ — отношение электропроводностей и толщин оболочки и жидкого металла; ω — угловая скорость; $p_2 - p_1$ — перепад давления, возникающий на активной зоне; k_l — коэффициент, приближенно учитывающий уменьшение электромагнитного давления из-за влияния продольного краевого эффекта и зависящий от числа полюсов; в данных проработках для $2p \geq 8$ $k_l = 0,9$ [7].

Коэффициент C_l введен на основании следующих соображений. В [7] допускается, что, несмотря на уменьшение механической мощности из-за введения коэффициента k_l , джоулевы потери в жидком металле не уменьшаются по сравнению со случаем отсутствия продольного эффекта. Однако в более поздней работе [8] выяснено, что джоулевы потери на большей части шкалы скольжений s превышают идеальные (т. е. такие, где продольный эффект не учтен). Это увеличение потерь охарактеризовано в (1) и (2) введением коэффициента C_l , который вычислялся на основании расчетных результатов работы [8] и приближенно был постоянным в рабочем диапазоне скольжений.

По соотношению (1) находилось оптимальное скольжение вблизи максимума η_a . При этом Q и $(p_3 - p_2)$, σ , ρ заданы, толщина оболочки Δ_1 выбиралась из соображений надежности (2,5 мм); выбор параметров d , ω и Δ был обусловлен необходимостью обеспечения приемлемых значений соотношения зазора и полюсного деления, глубины проникновения поля в толщу жидкого металла, уровня скорости в канале.

Гидравлика диффузора с поворотом потока в центральный канал была учтена согласно экспериментальным результатам работы [10].

Обеспечение допустимости низкого давления на всасывающей стороне насоса достигается устройством активного конфузора, т. е. конфузора, снабженного обмоткой бегущего поля (рис. 2—а). Часть этого конфузора до точки x_1 не имеет обмотки и давление там падает по мере роста скорости по закону Бернулли. Дальнейший спад давления по оси замедляется в связи с вкладом, который дает обмотка бегущего поля. На конфузоре размещаются два полюса обмотки, обтекаемой тем же током, что и обмотка, расположенная в активной зоне. Зона конфузора разбивалась на несколько участков, причем в пределах каждого из них допускалось постоянство зазора, индукции, скольжения; расчет энергии

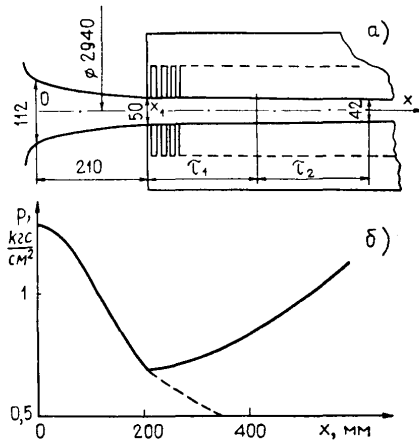


Рис. 2.

Рис. 2. а) Схема активного конфузора (показаны размеры для рассчитанного насоса I контура);

б) изменение абсолютного давления вдоль оси конфузора для насоса I контура. Штриховой линией показано изменение давления при отсутствии воздействия обмотки.

Рис. 3. Кривые намагничивания и потери в стали Э330 при температурах до 600° С. Частота 50 гц.

1 — до отжига при 20° С; 2 — после отжига при 20° С; 3 — 300° С; 4 — 400° С; 5 — 500° С; 6 — 600° С (все образцы отожженные).

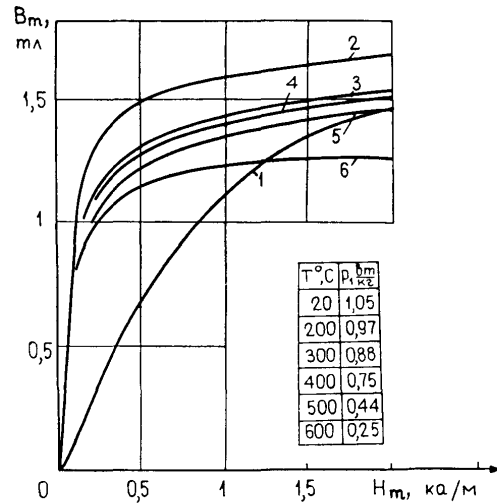


Рис. 3.

тических характеристик каждого участка проводился по формулам, подобным (1) и (2). Допустимость такого подхода обусловлена относительно небольшим изменением зазора на входе и выходе (около 20%).

На рис. 2—б показано изменение абсолютного давления вдоль оси конфузора для рассчитанного насоса I контура, параметры которого указаны ниже. Видно, что абсолютное давление нигде не опускается ниже 0,72 кгс/см², что обеспечивает отсутствие кавитации для натрия при температуре 400÷500° С.

В качестве материала магнитопроводов предлагается применение дешевой динамной стали Э330, допустимость чего для температур 400÷600° С экспериментально установлена в работе [11].

На рис. 3 даны согласно [11] кривые намагничивания этой стали при указанных температурах.

В качестве электрической изоляции может быть применен материал, полученный на основе синтетической слюды, — фторфлогопит, созданный в ВЭИ [12]. Этот материал может работать при напряжениях 3÷6 кВ при температуре 500° С.

Изоляция выдержала облучение в контейнерах интегральным потоком 10¹⁹÷10²⁰ нейтр/см² без повреждения.

Определенной проблемой, требующей дополнительного исследования, является обеспечение надежности изоляции в конструкции с учетом большой длины кольцевых секций обмотки и возможности появления трещин из-за различия коэффициентов линейного расширения изоляции и меди.

Обеспечение режима расхолаживания облегчается тем, что питание электромагнитных насосов осуществляется от индивидуальных синхронных генераторов, вращаемых приводным синхронным (или асинхронным) двигателем агрегата, имеющим большой запас энергии маховых масс. Наличие таких вращающихся машин не эквивалентно вращающимся частям в механическом насосе, так как эти машины находятся в отдельном безопасно обслуживаемом помещении, имеют простые тихо-

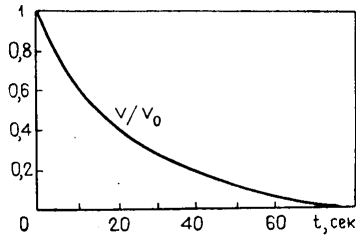


Рис. 4. Изменение скорости в канале насоса I контура при отключении приводного двигателя питающего синхронного генератора $v_0 = 15$ м/сек.

ходные подшипники, могут иметь готовые к работе дублиры. В связи с таким решением был выполнен анализ переходных процессов в системе индукционный насос — синхронный генератор [13].

Переходный процесс в насосе характеризуется уравнениями тока в фазе обмотки насоса, токов в слое жидкого металла, движения жидкого металла. Эти уравнения дополняются уравнениями движения ротора синхронной машины и тока в цепи ее обмотки переменного тока. На рис. 4 показан рассчитанный процесс уменьшения скорости в насосе I контура в долях начального значения v_0 при полном исчезновении напряжения сети. Благодаря значительному маховому моменту агрегата процесс оказывается достаточно медленным: через 1,5 сек скорость составляет 93%, через 1 мин — 7% начального значения, что удовлетворяет поставленным условиям.

При кратковременных (менее 1,5 сек) исчезновениях сетевого напряжения должна даваться команда на гашение поля приводного синхронного двигателя без отключения его статора, причем в случае восстановления напряжения этот двигатель, вращающийся со скоростью, близкой к подсинхронной, может вновь синхронизироваться с сетью (после подачи возбуждения), и нормальная работа насосов восстановится.

На базе полученных уравнений необходимо проанализировать процесс при работе обратного клапана, что еще не проводилось. Осложняющей особенностью больших индукционных цилиндрических насосов является возможность появления неустойчивостей течения, вследствие чего может возникнуть стационарная неоднородность распределения осевой скорости по кольцевой щели насоса, подобная показанной на рис. 5 [6]. С ростом отношения диаметра канала к полюсному делению неоднородность увеличивается. Кривые рис. 5 рассчитаны без учета трения в канале насоса.

Теоретический анализ [6] показал, что устойчивость течения (по отношению к малым возмущениям) с сохранением однородного профиля осевой скорости в насосе обеспечивается при выполнении условия

$$R_m < R_{m \text{ кр}}, \quad (3)$$

где $R_m = \sigma \omega s \tau^2 / \pi^2$ — магнитное число Рейнольдса, $R_{m \text{ кр}}$ — магнитное критическое число Рейнольдса, определенное в [6].

В частности, без учета трения получается следующее наименьшее значение $R_{m \text{ кр}}$ (т. е. наиболее жесткое условие обеспечения устойчивости):

$$R_{m \text{ кр}} = \sqrt{1 + (2\tau/\pi d)^2}. \quad (4)$$

Учет влияния трения повышает область устойчивости течения и, по-видимому, уменьшит неоднородность стационарного распределения по сравнению с рис. 5.

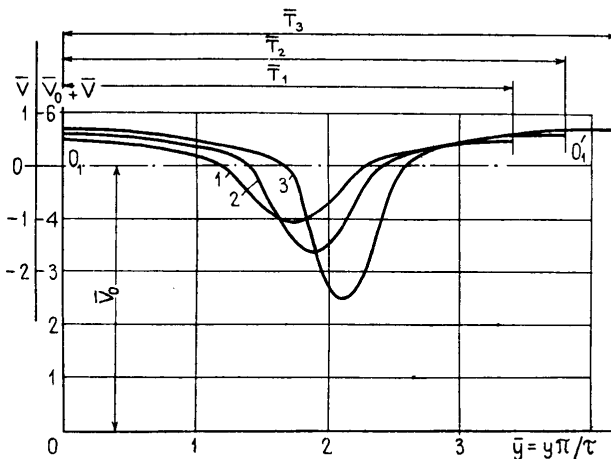


Рис. 5. Примеры расчетных стационарных неоднородностей осевой скорости для трех значений периода T_1, T_2, T_3 (кривые 1, 2, 3 соответственно). Везде $R_m = 2,2$; $s = 0,2$. Возмущения скорости \bar{v} отсчитываются от оси $O_1 O'_1$, полная скорость $\bar{v}_0 + \bar{v}$ — от оси \bar{y} .

Таблица 1

Наименование	Насос I контура	Насос II контура	Макетный образец
Число насосов на блок	4	4	1
Рабочее тело	Натрий	Натрий	Натрий
Температура рабочего тела на входе в насос, °С	300	300	300
Подача, м ³ /час	20 000	16 350	1270
Давление, кгс/см ²	8	5,1	4,3
Полный к.п.д. насоса, %	56,6	54,8	44,8
Активная мощность, потребляемая насосом, квт	7 680	4 160	331
Мощность кажущаяся, ква	11 600	6 500	590
Частота тока, гц	37,5	37,5	90
Амплитуда результирующей индукции, тл	0,25	0,24	0,206
Коэффициент мощности	0,66	0,635	0,55
Фазный ток, а	2 860	1 860	606
Плотность тока в обмотке, а/мм ²	2,5	2,16	2,33
Линейное напряжение, в	2 330	2 000	560
Число полюсов	12	8	10
	(с активным кон-фузором)		(с активным кон-фузором)
Толщина стенки канала, мм	2,5	2,5	1,5
Зазор, мм	42	42	16
Полюсное деление, м	0,221	0,221	0,105
Средний диаметр коаксиального канала, м	2,94	2,4	0,5
Температура обмотки (охлаждение к натрию), °С	368	385	360
Скорость в канале, м/сек	14,35	14,35	14
Магнитное число Рейнольдса в номинальном режиме	0,99	0,99	0,935
Масса активных материалов, т	43,4	24,3	1,85
Полная масса насоса, т	59	37	2,5

При проектировании насосов параметры подбирались так, чтобы в номинальном режиме соблюдалось условие (3). Отметим, что рассматриваемый вопрос требует дальнейшего теоретического анализа и экспериментальной проверки на крупном макете.

Полученные в итоге расчетов гидравлических, электрических и тепловых характеристик, а также эскизной проработки конструкции результаты по электромагнитным насосам с подачами 20 000 и 16 350 м³/час указаны в табл. 1. Конструктивная проработка показывает реализуемость основных узлов, хотя еще оставляет широкое поле для усовершенствований и коррекций размеров. В табл. 1 приведены также данные рассчитанного макетного образца, моделирующего крупные насосы. Постройка подобного образца и его исследование необходимы для экспериментальной проверки методики расчета.

Таблица 2

Наименование машин агрегата	Тип	Мощность кажущаяся, ква	Мощность, квт	Напряжение, в	Скорость, об/мин	Частота, гц
Приводной синхронный двигатель	СДС3-19-125-16У4	22 400	19 500	6000	375	50
Синхронный генератор насоса I контура	МС325-20/12У4	12 000	9 000	2250	375	37,5
Синхронный генератор насоса II контура	МС325-12/12У4	7 700	6 150	2250	375	37,5
Три однотипных возбуждителя синхронных машин	П12-450-132-4У4	—	125/5	250/50	375	—
Маховой момент агрегата, т·м ²		280				

Таблица 3*

Величина	Механические насосы (данные пересчета)		Электромагнитные насосы	
	I контур	II контур	I контур	II контур
Подача, $m^3/час$	20 000	16 350	20 000	16 350
Давление, $кгс/см^2$	8	5,1	8	5,1
Полезная гидравлическая мощность, $квт$	4 350	2 280	4 350	2 280
К. п. д., %	70	70	56,6	54,8
Потребляемая из сети мощность, $квт$	6 230	3 260	7 680	4 160
Общая масса насоса, $т$	216	113	59	37
Стоимость насосов без электродвигателя, млн. руб.:				
а) головной образец (1 шт.)	2,06	1,34	0,33	0,214
б) штатные образцы и 1 резервный (всего по 5 шт.)	$1,3 \times 5 = 6,5$	$0,875 \times 5 = 4,375$	$0,165 \times 5 = 0,825$	$0,107 \times 5 = 0,535$
Стоимость электродвигателей (по 6 шт.), млн. руб.	$0,144 \times 6 = 0,864$	$0,107 \times 6 = 0,642$	—	—
Общая стоимость системы силового электропитания, млн. руб.	0,96		$5 \times 0,4 = 2,0$	
Стоимость помещения для системы электропитания, млн. руб.	0,3		0,5	
Итого капиталовложения, млн. руб.	17,1		4,4	
Общее количество потребленной насосами энергии за 7 лет работы, $квт \cdot час$	$1,21 \cdot 10^9$		$1,51 \cdot 10^9$	
Принятая стоимость 1 $квт \cdot час$, коп.	1		1	
Общая стоимость потребленной за 7 лет эксплуатации электроэнергии, млн. руб.	12,1		15,1	

* Стоимостные показатели ориентировочные.

Питание восьми насосов блока осуществляется от четырех идентичных машинных агрегатов, данные которых представлены в табл. 2. Агрегаты (вместе с одним резервным) размещаются в отдельном помещении.

Было проведено технико-экономическое сравнение вариантов электромагнитных и механических насосов. Данные по механическим насосам для расходов 20 000 и 16 350 $m^3/час$ были определены пересчетом по данным существующих насосов на расходы до 9700 $m^3/час$.

При сравнении вариантов учитывалось различие в капиталовложениях и в стоимости электроэнергии, потребленной в обоих случаях за срок окупаемости 7 лет.

В анализе учитывалась также стоимость оборудования (с помещением) для силового энергопитания насосов в обоих сравниваемых вариантах. Эксплуатационные затраты допускались одинаковыми. Основные результаты сравнения даны в табл. 3. Общий экономический эффект на один блок мощностью 1500 $квт$ составит

$$Q = 17,1 - 4,4 + 12,1 - 15,1 = 9,7 \text{ млн. руб.}$$

в пользу электромагнитных насосов.

Помимо снижения стоимости следует указать на существенное уменьшение массы насосов, простоту регулирования подачи и надежность электромагнитных насосов.

Выводы. Дальнейшая работа в направлении создания электромагнитных насосов с подачей до 20 000 $m^3/час$ и выше целесообразна. Ближайшей задачей является продвижение некоторых вопросов теории, в частности вопроса устойчивости течения в кольцевой щели насоса, дальнейший анализ некоторых аварийных переходных режимов.

Необходима постройка достаточно крупного макета насоса (подобного указанному в табл. 1), моделирующего основные соотношения и конструктивные решения натурального устройства, и его экспериментальное исследование с целью подтверждения методики расчета, проверки работоспособности активного конфузора, анализа вопросов устойчивости течения и проверки конструктивных решений. Необходима также дальнейшая отработка высокотемпературной изоляции в конструкции крупногабаритных секций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Лейпунский А. И. и др.* Аппараты на быстрых нейтронах БН-350 и БОР. Лондон, май 1965.
2. *Петросьянц А.* Пути мирного атома. — «Правда», 1973, № 265 (20139).
3. *Лейпунский А. И. и др.* Атомная электростанция с реактором БН-600. — Атомная энергия, 1968, т. 25, № 5, с. 403.
4. *Ринейский А. А., Аристархов Н. Н., Карнов А. В., Никулин М. П., Тymoш Б. С., Яровицын В. В.* Sodium-Cooled fast Reactor Engineering. IAEA NSM — 130/68, Vienna, 1970.
5. *Глухих В. А.* Некоторые вопросы проектирования индукционных насосов. — Магнитная гидродинамика, 1972, № 3, с. 61.
6. *Волчек Б. Б., Гехт Г. М., Толмач И. М., Элькин А. И.* О гидродинамической неустойчивости и вызванных ею стационарных течениях в коаксиальном канале индукционного насоса. — Магнитная гидродинамика, 1976, № 2, с. 62.
7. *Лиелпетер Я. Я.* Индукционные МГД-машины. Рига, «Зинатне», 1969.
8. *Кириллов И. Р.* Продольный концевой эффект в индукционных цилиндрических МГД-машинах. — Магнитная гидродинамика, 1972, № 2, с. 109.
9. *Янговский Е. И., Толмач И. М.* МГД генераторы. М., «Наука», 1972.
10. *Баранов Г. А., Глухих В. А., Тананаев А. В.* Результаты гидравлического исследования цилиндрического электромагнитного насоса. — Магнитная гидродинамика, 1968, № 4, с. 153.
11. *Каган И. Я., Каган Я. И., Толмач И. М.* Динамическая кривая намагничивания и потери на гистерезис и вихревые токи стали Э330 и пермендюра ЭП207. Электротехническая промышленность (в печати).
12. *Калитвянский В. И., Тучинский А. М., Александров М. Н., Аснович Э. З., Колганова В. А.* Пути создания высоковольтной высокотемпературной электрической изоляции. — Электротехника, 1972, № 5, с. 10.
13. *Гехт Г. М., Толмач И. М.* Переходные процессы в индукционном насосе, питающемся от индивидуального синхронного генератора. — Магнитная гидродинамика, 1976, № 1, с. 127.

Поступила 6 мая 1975 г.