

УДК 62-83:621.313.3

А.А. Пугачев, Д.А. Бондаренко

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В АСИНХРОННОМ ДВИГАТЕЛЕ¹

Показана правомерность исследований характеристик тяговых электроприводов с асинхронными двигателями на физических моделях меньшей мощности на примере двигателей мощностью 380 и 14 кВт. Описана информационно-измерительная система, приведены методика и результаты экспериментальных исследований процессов нагрева и охлаждения асинхронного двигателя мощностью 14 кВт при его питании от преобразователя частоты с системой скалярного управления с IR-компенсацией в режиме с низкими частотами вращения. Установлено, что при околонулевых (пусковых) значениях частоты тока статора наибольший перегрев испытывают стержни короткозамкнутого ротора, при повышении частоты – обмотка статора.

Ключевые слова: физическое моделирование, асинхронный двигатель, нагрев, охлаждение, скалярное управление.

Исследования в области тягового электропривода локомотивов [1; 2] показывают, что для эффективной реализации тяговых усилий и экономичности преобразования энергии в тяговом двигателе и всей электропередаче локомотива в целом необходимо совместное рассмотрение работы силовой электрической, управляющей и механической частей с учетом тепловых процессов.

Температура обмоток асинхронного двигателя влияет на режимы работы электропривода, в частности изменяет статические механические характеристики, нарушает настройки систем оптимального управления по какому-либо показателю качества. Особенно критичным это является в тяговых электроприводах, где кроме жестких требований по энергетическим и массогабаритным показателям электропривод должен реализовывать заданное тяговое усилие для обеспечения требуемого качества переходного процесса. При синтезе систем управления температура оказывает наиболее существенное влияние на значение активного сопротивления статора. Из-за использования операции интегрирования при вычислении потокосцепления статора система прямого управления моментом очень чувствительна к значению активного сопротивления статора, и при ошибке расчета этого сопротивления более чем 1 % показатели качества регулирования частоты вращения резко ухудшаются [3]. При увеличении ошибки система может потерять устойчивость.

Для уменьшения температуры обмоток и теплонагруженных элементов тяговых двигателей их оборудуют системами воздушного охлаждения [4]. По результатам ряда экспериментальных исследований [4-6], проведенных для маневровых, маневрово-вывозных и магистральных локомотивов на различных участках Северной, Казахской и Среднеазиатской железных дорог, угольных разрезах Красноярского края и Кемеровской области, сортировочной станции Брянск-2, установлено, что ни при каких уровнях токовых нагрузок и условиях охлаждения тяговых двигателей величина превышения температуры обмоток тяговых двигателей не превышает установленного ГОСТом предельно допустимого значения. В работе [7] отмечается, что «в условиях эксплуатации превышение температуры обмоток над температурой охлаждающего воздуха крайне редко достигает допустимых пределов». Таким образом, снижение расхода воздуха через тяговые двигатели, не нуждающиеся в интенсивном охлаждении, позволяет значительно снизить расход энергии, потребляемой двигателями вентиляторов системы охлаждения. С учетом современного уровня развития техники наиболее экономичным способом уменьшения расхода воздуха

¹Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (научный проект № 14-08-31274).

является оборудование вентилятора регулируемым электроприводом с преобразователем частоты, работа которого организована в замкнутой автоматической системе регулирования с обратной связью по температуре.

Комплексный подход к исследуемому объекту требует значительного увеличения объема исследований в целом. Поскольку возможность увеличения объема натурных экспериментов на практике ограничена, то возникает потребность в резком увеличении объема предварительных и сопутствующих исследований методами математического и стендового моделирования и развитии методики взаимосвязи работ по такому моделированию с натурным экспериментом. При этом, в связи со значительной стоимостью полноразмерных стендовых установок тяговых электроприводов с асинхронным двигателем и тем, что математические модели не всегда позволяют выявить все проблемы устойчивости и динамики объединенной электрической, механической и тепловой систем, часть работ имеет смысл проводить на стендах, которые представляют собой физические модели таких систем и могут быть на порядок дешевле полноразмерного стенда. Особенно это важно для случаев, когда возникает проблема проведения большого числа экспериментов, требующих значительных и дорогостоящих переделок натурального стенда.

Таким образом, для исследования теплового состояния тягового асинхронного двигателя с целью последующего синтеза автоматической системы регулирования температуры его обмоток выбран метод физического моделирования.

На кафедре «Подвижной состав железных дорог» Брянского государственного технического университета (БГТУ) разработана и изготовлена физическая модель энергетической цепи и тягового привода тепловоза с электрической передачей переменного тока [8; 9], содержащая все элементы моделируемого объекта. Для определения критериев подобия модели тягового привода использован способ относительных единиц, а для определения критериев подобия механической части привода – π -теорема.

При моделировании электрической машины как элемента энергетической и тепловой системы достаточно осуществления неполного, а в отдельных случаях и приближенного подобия. В такой модели [10] может быть не полностью отражено влияние на ее параметры изменения частоты, насыщения, потерь в отдельных обмотках, вихревых токах и т.д.

При приближенном подобии, как правило, нецелесообразно проектировать и строить специальную модель-машину, а более выгодно использовать машины относительно малой мощности общепромышленного назначения.

Правомерность исследований характеристик тяговых электроприводов с асинхронными двигателями на физических моделях тяговых электроприводов меньшей мощности покажем на величине погрешности, получаемой при приближенном моделировании тягового двигателя ЭД-900 (мощность 380 кВт) общепромышленным двигателем АО-63-4 (14 кВт). Оценку проведем по величине момента на валу электродвигателя, поскольку эта величина является наиболее характерной:

$$\Delta M = \left| \frac{M_{дв.э.л} - M_{дв.э.д}}{M_{дв.э.л}} \right| 100\%,$$

где $M_{дв.э.д}$ – значение момента на валу двигателя ЭД-900; $M_{дв.э.л}$ – значение момента на валу двигателя АО-63-4, полученное при испытаниях.

Выполненные авторами расчеты [9; 10] показали, что погрешность в определении количественной величины момента даже при несовпадении режимов работы двигателей не превышает 25% (качественная картина процесса пульсаций момента полностью сохраняется), а в случае близости режимов работы погрешность не превышает 14%. При совпадении режимов работы погрешность в определении величины пульсаций момента не превышает 13%. Таким образом, можно осуществлять приближенное моделирование асинхронного тягового двигателя двигателем значительно меньшей мощности с достаточной степенью точности.

При проведении экспериментальных исследований применялись следующие методика и информационно-измерительная база. Для построения статических характеристик определены установившиеся значения величины температуры θ для нескольких значений подачи охлаждающего воздуха $G_{вз}$ при нескольких неизменных значениях тока обмотки статора I_s . В документации [11], определяющей порядок проведения испытаний электрических машин на нагревание, установившимся считается такой процесс изменения температуры, при котором температура изменяется не более чем на 1°C в час.

Величина подачи охлаждающего воздуха $G_{вз}$ определялась по измеренному среднему значению скорости воздушного потока в воздуховоде $V_{ср}$. При измерении $V_{ср}$ были выполнены следующие условия:

- измерительный участок создает практически ламинарное движение воздушного потока;
- длина измерительного участка в 5–7 раз больше его гидравлического диаметра.

Распределения превышения температур в обмотках статора, ротора и на корпусе двигателя измеряются с помощью хромель-копелевых термопар 1,5 мм. Термопары располагаются на статоре в трех сечениях – на лобовых частях обмотки статора со стороны поступления охлаждающего воздуха и на противоположной стороне, а также в массиве статора на расстоянии 45 мм от поверхности (по 3 термопары в каждом сечении, сдвинутые на 120°), на роторе – в массиве на расстоянии 40 мм от поверхности. Информационный сигнал высокочувствителен к электромагнитным влияниям и другим помехам, поэтому применено защитное алюминиевое экранирование проводов термопар для уменьшения влияния со стороны двигателя и окружающего пространства, а также для увеличения надежности и достоверности измерения температуры. Передача информации с термопар, установленных на роторе, осуществляется через скользящий контакт ртутного токосъемника. Сигналы со всех термопар поступают на многофункциональную плату аналого-цифрового преобразования ЛА-2USB-12 (производства ЗАО «Руднев – Шиляев») и с нее на персональный компьютер. Для сбора и хранения данных имеется поставляемое в комплекте с ЛА-2USB-12 программное приложение SaverSE.

С помощью термоанемометра AZInstrument 8908 измерялись значения скорости потока. Далее была определена тарировочная зависимость подачи охлаждающего воздуха $G_{вз}$ от скорости потока и, как следствие, частоты вращения вала ротора двигателя вентилятора охлаждения. В ходе экспериментальных исследований для определения величины $G_{вз}$ использовалась эта тарировочная зависимость. Эксперименты по определению статических характеристик повторялись несколько раз, затем полученные результаты усреднялись. Необходимость в этом была вызвана тем, что не всегда удавалось обеспечить условия для поддержания постоянства температуры окружающего воздуха.

Методика исследований динамических свойств системы охлаждения асинхронного двигателя как объекта регулирования температуры включает следующие основные положения:

- переходные временные характеристики системы охлаждения определяются при однократном скачкообразном изменении только одного из воздействий – регулирующего или одного из возмущающих – и поддержании постоянными остальных;
- величина однократного скачкообразного воздействия не должна превышать 15% от максимально возможной величины вносимого возмущения;
- однократное скачкообразное воздействие вносится при установившемся температурном режиме системы охлаждения, причем по достижении нового установившегося состояния вносится новое однократное скачкообразное воздействие того же значения, что и предыдущее, но обратного знака.

Результаты тепловизионной съемки асинхронного двигателя в установившемся тепловом режиме посредством портативного тепловизора Testo 875i, обладающего температурной чувствительностью 50 мК при 30°C , приведены на рис. 1. Результаты экспериментальных исследований статических и динамических тепловых режимов работы приведены на рис. 2.

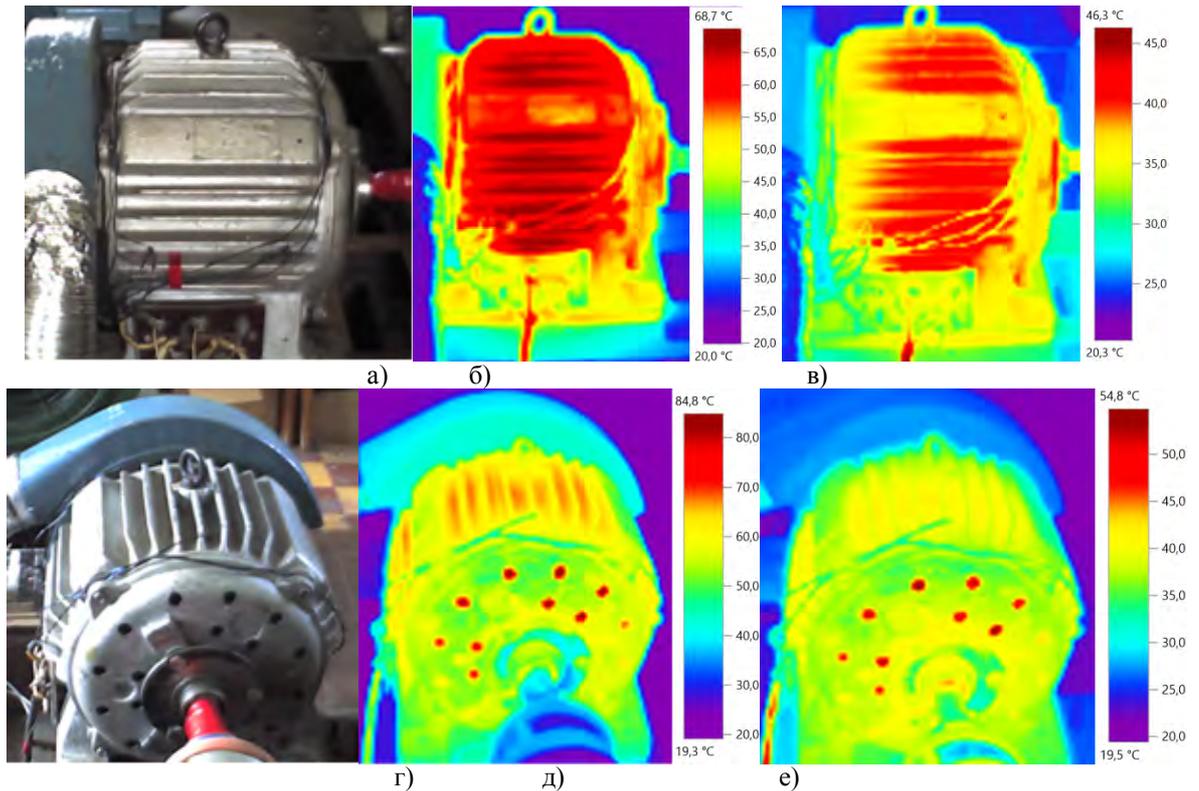


Рис. 1. Результаты тепловизионной съемки: фотографии двигателя (а, г), термограммы при токе статора $I_s = 15$ А, частоте тока статора $f_j = 10$ Гц, частоте вращения вала ротора $n = 272$ об/мин без принудительного охлаждения (б, д) и при расходе охлаждающего воздуха $G_{вз} = 0,95$ м³/с (в, е)

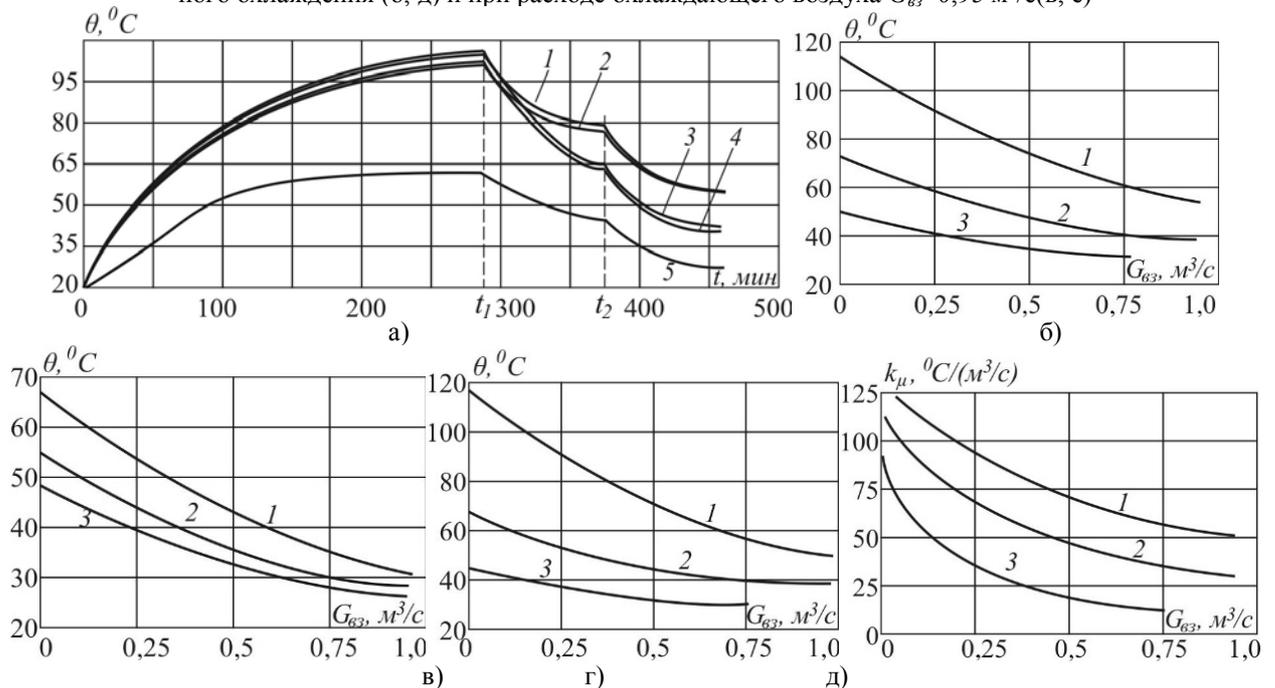


Рис. 2. Результаты экспериментальных исследований: осциллограмма переходного процесса изменения температуры различных узлов двигателя (а) (1, 2 – короткозамкнутое кольцо ротора и лобовая часть обмотки статора соответственно со стороны, противоположной подаче воздуха; 3, 4 – короткозамкнутое кольцо ротора и лобовая часть обмотки статора соответственно со стороны подачи воздуха; 5 – массив статора в среднем сечении), статические характеристики системы охлаждения асинхронного двигателя для короткозамкнутого кольца ротора со стороны, противоположной подаче воздуха, при $f_j = 5$ Гц (б), массива статора в среднем сечении при $f_j = 5$ Гц (в), лобовой части обмотки статора со стороны, противоположной подаче воздуха, при $f_j = 10$ Гц (г) и зависимости коэффициента передачи лобовой части обмотки статора от подачи охлаждающего воздуха при $f_j = 10$ Гц (д) (1 – $I_s = 22$ А; 2 – $I_s = 15$ А; 3 – $I_s = 10$ А)

Температура окружающего воздуха во время проведения экспериментов составляла 20...21 °С. Закон управления асинхронным двигателем – $u_s/f_1 = \text{const}$, где u_s – напряжение обмотки статора (с применением IR-компенсации).

Выбор низких значений напряжения, частоты тока статора, а следовательно, и частоты вращения вала ротора для проведения эксперимента обусловлен тем, что именно на низких позициях контроллера машиниста тяговый двигатель испытывает наибольшие перегрузки по току, так как только при пуске действует ограничение по максимальному моменту (по току), поэтому значения температуры теплонагруженных узлов двигателя в этих режимах оказывают критическое влияние на работу электропривода в целом.

Рис. 2а показывает временной отклик системы на приложение возмущения со стороны тока обмотки статора в начале переходного процесса (I_s скачкообразно меняется от 0 до 15 А) и на приложение задающих воздействий со стороны подачи охлаждающего воздуха в моменты времени t_1 ($G_{вз}$ скачкообразно меняется от 0 до 0,475 м³/с) и t_2 ($G_{вз}$ скачкообразно меняется от 0,475 до 0,95 м³/с). Анализ переходных процессов (рис. 2а) показывает, что с точки зрения теории автоматического управления динамические свойства обмотки статора и стержней (короткозамкнутого кольца) ротора как объекта регулирования температуры удовлетворительно аппроксимируются апериодическим звеном первого порядка, в то время как массив статора целесообразно представлять апериодическим звеном второго порядка с различными постоянными времени.

Анализ статических режимов работы показывает, что при работе на низких, около нулевых значениях частоты тока статора наибольший перегрев испытывает обмотка ротора (при $f_1 = 2,5$ Гц максимальное превышение температуры колец над лобовой частью обмотки статора составляет 5 °С, при $f_1 = 2,5$ Гц – 2 °С). При увеличении частоты тока статора наибольший перегрев испытывает уже обмотка статора, причем чем больше f_1 , тем больше разница (при $f_1 = 7,5$ Гц максимальное превышение температуры лобовой части обмотки статора над кольцами ротора составляет 2 °С, при $f_1 = 10$ Гц – 4 °С). Результаты исследований свидетельствуют, что чем напряженнее режим работы, т.е. чем больше ток статора и интенсивнее выделение тепловых потерь, тем более отличаются друг от друга температуры расположенных рядом частей электрической машины. Таким образом, в большем диапазоне рабочих режимов тягового двигателя наиболее теплонагруженным элементом является обмотка статора, что указывает на необходимость использования значения ее температуры как лимитирующего фактора при синтезе автоматической системы регулирования температуры.

Следует отметить, что результаты экспериментального исследования распределения температуры показали высокую сходимость с результатами теоретических исследований на математической модели [14].

Соотношение температур между лобовой частью обмотки статора и ее пазовой частью в данной работе не исследовалось, однако результаты работ [12; 13] показывают, что температура обмотки статора, уложенной в пазы, обычно на 5-10 °С ниже, чем в лобовых частях со стороны, противоположной вентиляционному люку. Теоретически это объясняется хорошей тепловой проводимостью стали статора и ротора (осевая вентиляция через воздушный зазор отводит часть тепла от пазов и зубцов статора, в то время как в радиальном направлении тепло рассеивается через сталь статора и корпуса двигателя).

Как видно из графиков (рис. 2), экспериментальные кривые температуры нагрева обмотки статора и статические характеристики системы охлаждения нелинейны во всем диапазоне изменения подачи охлаждающего воздуха, что свидетельствует о существенной нелинейности объекта регулирования. Значения коэффициента передачи k_{μ} изменяются в широких пределах (в 10 раз и более) в зависимости от величины подачи охлаждающего воздуха $G_{вз}$ и увеличиваются при возрастании тока в цепи статора электродвигателя. При этом меньшим значениям $G_{вз}$ соответствуют большие значения k_{μ} .

Таким образом, результаты экспериментального исследования распределения температуры показали, что асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором является неоднородным нелинейным тепловым объектом. Наибольший перегрев в зависимости от режима работы испытывают либо стержни ротора, либо обмотка статора. Этот вывод указывает на необходимость строгого подхода к выбору лимитирующего по нагреву элемента двигателя, температура которого измеряется в реальном времени и служит для организации обратной связи в системе управления электропривода.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Система управления тягового электропривода с контролем температуры теплонагруженных элементов / А.С. Космодамианский [и др.] // Электротехника. - 2014. - № 8. - С. 38 – 43.
2. Пугачев, А.А. Система управления тяговым асинхронным двигателем с минимизацией мощности потерь / А. А. Пугачев, В. И. Воробьев, А. С. Космодамианский // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2015. – № 2 (46). – С. 55–61.
3. Козярук, А.Е. Современное и перспективное алгоритмическое обеспечение частотно-регулируемых электроприводов/А.Е. Козярук, В.В. Рудаков; под ред. А.Г. Народицкого. – СПб.: С.-Петербург. электротехн. компания, 2004. - 128 с.
4. Космодамианский, А.С. Автоматическое регулирование температуры обмоток тяговых электрических машин локомотивов: монография / А.С. Космодамианский. – М.: Маршрут, 2005. – 256 с.
5. Немухин, В.П. Оценка надежности основных узлов ТЭД тепловозов по результатам эксплуатации / В.П. Немухин, В.А. Горбатюк; ВНИИЖТ. – М.: Транспорт, 1974. – Вып. 527. – С. 4 – 20.
6. Немухин, В.П. Эффективность применения нагревостойкой изоляции в ТЭМ тепловозов / В.П. Немухин, В.Н. Яковлев. – М.: Транспорт, 1976. – 46 с.
7. Оценка нагрева тяговых двигателей электровозов переменного тока в условиях эксплуатации / И.В. Скогорев [и др.] // Повышение эффективности и качества работы электроподвижного состава: труды РИИЖТ. – Ростов н/Д, 1984. – Вып. 176. – С. 71 – 78.
8. Космодамианский, А.С. Экспериментальная установка для исследования и регулирования процессов нагрева и охлаждения асинхронного двигателя / А.С. Космодамианский, В.И. Воробьев, А.А. Пугачев // Вестник Всероссийского научно-исследовательского и проектно-конструкторского института электровозостроения. – Новочеркасск, 2011 – № 2 (62). – С. 65 – 76.
9. Комплексная физическая модель тягового электропривода с асинхронными двигателями / А.С. Космодамианский [и др.] // Наука и техника транспорта. – 2014. - № 3. – С. 31 – 38.
10. Космодамианский, А.С. Применение метода анализа размерностей к исследованию электромеханических характеристик тяговых асинхронных двигателей / А.С. Космодамианский, В.И. Воробьев, А.А. Пугачев // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2012. – № 3. – С. 3 – 11.
11. ГОСТ 12259-75. Машины электрические. Методы определения расхода охлаждающего газа.
12. Mellor, P. H. Lumped parameter thermal model for electrical machines of TEFC design / P.H. Mellor// IEE Proc. - Electr. Power Appl. – 1991. –Vol. 138. – P. 205-218.
13. Champenois, I. G. Electrical and thermal performance predictions in inverter-fed squirrel-cage induction motor drives / I.G. Champenois // Electr. Mach. Power Syst. – 1994. – Vol. 22. –№3.– P. 355-369.
14. Пугачев, А.А. Результаты расчета тепловых процессов в асинхронном двигателе / А.А. Пугачев, Д.А.Бондаренко // Электропривод, электротехнологии и электрооборудование предприятий: сб. науч.тр. II Междунар. (V Всерос.) науч.-техн. конф. – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2015. – С. 220 – 223.

Материал поступил в редколлегию 11.05.15.