F. Shagaliev, I. Khusnutdinov, F. Gafarov

DECREASING FODDER EXPENSES ON MILK PRODUCTION

Key words: *feeding ration; mixed fodder; concentrates; legumes; cereal-legumes; exchange energy; amino acid; digestibility; dry substance; full value.*

Authors' personal details

1. **Shagaliev Fanus**, Candidate of agricultural sciences, head of the laboratory of animal feeding and fodder technology, Bashkir agricultural research institute, Ufa federal research center, Russian Academy of Sciences, 450059, Ufa, R. Zorge st., 19, Phone: 8 (347) 223-09-26, e-mail: bagri@ufanet.ru.

2. **Khusnutdinov Ildar**, Post-graduate student of the Bashkir agricultural research institute, Ufa federal research center, Russian Academy of Sciences, 450059, Ufa, R. Zorge st., 19, phone: 8 (347) 223-09-26, e-mail: bagri@ufanet.ru.

3. **Gafarov Fanus**, Candidate of agricultural sciences, associate professor of the meat, dairy products technology and chemistry department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Bashkir State Agrarian University», Ufa, 50-letiya Otyabrya St., 34, phone: 8 (347) 228-07-17, e-mail: nio_bsau@mail.ru.

A comparative assessment was made for using bean – cereal grass silage (alfalfa + brome) and the same canned silage «Baikal EM 1» when feeding

dairy cows. Feeding cows with canned silage contributed to increased milk productivity and reduced fodder costs.

© Шагалиев Ф.М., Хуснутдинов И.З., Гафаров Ф.А.

УДК 621.436.001.1

DOI: 10.31563/1684-7628-2018-46-2-93-100

О.Н. Дидманидзе, Р.Т. Хакимов, А.В. Неговора

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМЫ ПИТАНИЯ ГАЗОВОГО ДВИГАТЕЛЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СЖИЖЕННОГО МЕТАНА

Ключевые слова: *газовый двигатель; пиковое давление; критическая температура; расчетный объем; сжиженный газ; двухфазный поток.*

Введение. Природный газ как энергоноситель в 3–5 раз дешевле топлива, полученного из нефти, что делает его весьма конкурентоспособным [1]. Однако криогенное топливо имеет следующие недостатки: малая плотность, сверхнизкие температуры в криогенном состоянии, высокая летучесть, а при неумелом обращении – взрывоопасность, что изначально вызывает определенную настороженность при постановке вопроса о его использовании и сомнение в целесообразности широкого внедрения такого вида энергоносителей, даже несмотря на энергетические, экономические и экологические преимущества. Этим в значительной мере можно объяснить многолетнее торможение инвестирования и низкие темпы работ по практическому решению задач и внедрению сжиженного природного газа (СПГ) в промыш-

ленность и сельское хозяйство [2]. Концентрационные пределы взрываемости смесей природного газа, например, метана, с воздухом составляют 5...15 %. Плотность метана, даже при температуре кипения, в 1,7 раза больше, чем у керосина, что приводит к необходимости увеличения объемов топливных баков более чем в 1,5 раза. Кроме того, метан имеет очень низкий диапазон нахождения в жидкой фазе (минус 20 °С) и низкую критическую температуру (–82,6 °С). Это требует внедрения новых технических и конструкторских решений с использованием энергоэффективных, прочных, термоустойчивых, хладостойких конструкций и уплотнительных материалов при создании топливных баков для хранения и подачи сжиженного метана в качестве основного моторного топлива автотранспортных средств.

Цель работы – показать, насколько можно увеличить энергоэффективность рабочих систем газового двигателя, обеспечив оптимальные эксплуатационные показатели агрегата и в целом автотранспортного средства.

Обсуждение результатов исследования. В отличие от стандартных видов топлива (бензин, дизельное топливо), метан для исключения двухфазного состояния нужно подавать в камеру сгорания двигателя в газообразном виде, используя специальное газобаллонное оборудование (ГБО) 4-го, 5-го или 6-го поколения с улучшенными экологическими показателями. В то же время по массовой теплоте сгорания ме-

тан превосходит керосин на 14 %, что важно для оптимизации параметров сгорания внутрицилиндровых процессов в поршневых двигателях.

На рисунке 1 представлена схема взаимосвязей агрегатов и систем, без оптимизации которых добиться повышения эксплуатационных и энергоэффективных показателей поршневого двигателя будет сложно. В настоящей статье в данной схеме будет рассмотрено только отдельное направление, а именно влияние конструкции системы питания на процессы подачи и сгорания метановоздушной смеси в камере сгорания.

Рисунок 1

Блок-схема взаимосвязи влияния конструкции агрегатов, механизмов и систем на повышение энергоэффективности работы газового двигателя

Рисунок 2

Особенности конструкции отечественных газовых двигателей

В России на данный момент существует два производителя газовых двигателей: КамАЗ с семейством двигателей КамАЗ-820 и УРАЛ – с семейством ЯМЗ-530 CNG, и оба завода при их проектировании использовали похожие передовые конструкторские разработки (рисунок 2).

Данные газовые двигатели относятся к экологическому классу ЕВРО-5 и при всех известных преимуществах имеют ряд недостатков: так как метан для заправки баллонов на 90 % используется в сжатом виде, конструкторы вынуждены устанавливать большое количество баллонов на автомобиль, что ухудшает их компоновку и конструкцию в целом; отсутствие комплексной электронной системы управления всеми системами газового двигателя снижает вероятность оптимизации ее энергоэффективности; конструктивно не предусмотрена возможность непосредственного впрыска газа в камеру сгорания для улучшения полноты сгорания, энергоемкости и экологичности двигателя; отсутствие способа реализации подвода газа в жидкой фазе до форсунки из-за конструктивных особенностей форсунки и решения сложных физических задач в плане конвек-

тивного теплообмена в граничных условиях низких и высоких температур.

Основные рабочие показатели газобаллонного оборудования системы питания автотранспортного двигателя представлены на рисунке 3.

Решение проблемы оптимальной подачи метана в камеру сгорания повысит энергоэффективность работы двигателя по всем показателям, в частности: 1) топливно-экономическим – благодаря высокой точности дозирования и стабильности цикловых подач метана непосредственно в камеру сгорания с учетом его теплофизических свойств, условий подогрева и воспламенения рабочей смеси; 2) мощностным – путем оптимизации регулировочных параметров метановоздушной смеси на впуске и рабочих показателей механизмов КШМ и ГРМ; 3) экологическим: внедрение вышеперечисленных разработок по оптимизации отдельных систем газовых двигателей позволит без дополнительных каталитических процессов довести изначально не лучшие показатели токсичности отработавших газов двигателя до уровня ЕВРО-6.

Представим комплексную схему (рисунок 4) электронного управления газовым двигателем при стендовых испытаниях.

Рисунок 3
Основные рабочие показатели системы питания газовых двигателей

Рисунок 4

Рабочая схема управления ГД и стендом при тестовых испытаниях:

1 – ЭБУ газовым двигателем (Корвет М10.3х); 2 – потенциометр; 3 – катушка зажигания; 4 – дроссельная заслонка; 5 – датчик углового положения дроссельной заслонки; 6 – газовый дозатор; 7 – датчик температуры на впуске; 8 – датчик температуры ОЖ; 9 – датчик угловой скорости и положения КВ; 10 – оптоэлектронный датчик для регулирования ГС на впуске; 11 – кислородный датчик (лямбда-зонд); 12 – свеча зажигания; 13 – электропривод дроссельной заслонки; 14 – датчик давления наддува; 15 – интеркулер; 16 – воздушный фильтр; 17 – датчик противодавления ОГ; 18 – сервомеханизм регулировки давления наддува; 19 – турбокомпрессор; 20 – блок управления CDI (N3/9); 21 – электронная педаль

Рассмотрим фрагменты математической модели тепломассообменных процессов и расчетные значения пикового давления в криобаке и трубопроводе СПГ при подаче свежего потока сжиженного метана, а также времени после

$$\rho \frac{di}{dt} = \lambda \nabla^2 T + \text{div} \left[(i_1 - i_2) \rho D \left(\nabla m + k_T \frac{\nabla T}{T} + k_P \frac{\nabla p}{p} \right) \right], \quad (1)$$

где ρ , i – плотность и энтальпия смеси; λ , D – коэффициенты теплопроводности и взаимодиффузии; i_1, i_2 – энтальпии компонентов смеси; m – относительная массовая концентрация i -го компонента; k_T, k_P – термодиффузионное и бародиффузионное отношение, p , T – давление и температура смеси, t – время.

Пиковое давление в газовом пространстве криобака и трубопровода можно определить из следующего выражения:

$$P_{\text{pik}} = P_r + \frac{\Delta m R_{\text{CH}_4} T}{V}, \quad (2)$$

где P_r – начальное давление в газообразной среде криобака и трубопровода; Δm – масса испарившегося метана; R_{CH_4} – газовая постоянная метана; T – температура метана в газообразной среде; V – объем газообразной среды.

На основании анализа результатов моделирования подачи свежего объема сжиженного метана [7] в исследуемые емкости (криобак и трубопроводы) для подачи СПГ установлено, что выражения изменения пикового давления

пополнения бака новой порцией топлива. Математические модели тепломассообменных процессов в криобаке СПГ [5,6] основаны на уравнениях термодинамики необратимых процессов в метановой смеси вида:

при его возникновении имеют вид, близкий к линейным функциям от определяющих параметров, и слабо зависят от объема топливного криобака, что позволяет сформулировать следующее выражение для оценки пикового давления:

$$P_{\text{pik}} = k_{\text{из}} \cdot k_{\text{г}} \cdot k_{\text{кон}} \cdot k_{\text{выс}} \cdot P_{\text{эт}}, \quad (3)$$

где P_{pik} – пиковое давление в проектируемом хранилище; $k_{\text{из}}$ – коэффициент подобия изоляции; $k_{\text{г}}$ – коэффициент подобия геометрии топливного криобака; $k_{\text{кон}}$ – коэффициент подобия начальных концентраций; $k_{\text{выс}}$ – коэффициент подобия высоты заполнения нижнего слоя; $P_{\text{эт}}$ – пиковое давление в эталонном топливном криобаке.

Результаты расчетов показали, что для описанного в статье [4] топливного криобака пиковое давление составляет $P_{\text{pik}} = 2,96$ МПа, а коэффициенты, учитывающие влияние определяющих параметров на изменение пикового давления, могут быть найдены по следующим зависимостям:

$$k_{из} = 0,221 \frac{\delta_{пр} \lambda_{эт}}{\delta_{эт} \lambda_{пр}} + 0,7789 \text{ при } \frac{\delta_{пр} \lambda_{эт}}{\delta_{эт} \lambda_{пр}} \leq 10, \quad (4)$$

или

$$k_{из} = 0,0021 \frac{\delta_{пр} \lambda_{эт}}{\delta_{эт} \lambda_{пр}} + 2,969 \text{ при } \frac{\delta_{пр} \lambda_{эт}}{\delta_{эт} \lambda_{пр}} \geq 10, \quad (5)$$

где $\delta_{эт}$, $\delta_{пр}$ – эквивалентные толщины эталонной и проектируемой изоляций, $\lambda_{эт}$, $\lambda_{пр}$ – эквивалентные теплопроводности эталонной и проектируемой изоляций;

$$k_{рад} = 0,4595 \frac{R_{пр}}{R_{эт}} + 0,5405, \quad (6)$$

где $R_{эт}$, $R_{пр}$ – радиусы эталонного и проектируемого трубопровода;

$$k_{кон} = \frac{\Delta CH_{4пр}}{\Delta CH_{4эт}}, \quad (7)$$

$$1 \leq \frac{\delta_{пр} \lambda_{эт}}{\delta_{эт} \lambda_{пр}} \leq 10; 0,667 \leq \frac{R_{пр}}{R_{эт}} \leq 1,333, \quad (9)$$

$$0,5 \leq \frac{\Delta CH_{4пр}}{\Delta CH_{4эт}} \leq 1,5; 0,895 \leq \frac{h_{пр}}{h_{эт}} \leq 1,105, \quad (10)$$

Погрешность вычисления оценочного значения пикового давления в газообразной среде по полученным зависимостям не превышает 10 % значений, найденных методом вычисления. Это является приемлемым результатом и позволяет сделать вывод о возможности использования полученных соотношений при выполнении расчетов при проектировании топливных криобаков для СПГ с целью снижения аварийных последствий и принятия определенных мер безопасности.

Определив значения пикового давления ($P_{пик}$) в трубопроводе, целесообразно определить критические значения по температуре ($T_{кр}$) смеси природного газа (95 % – метан, остальные 5 % – этан, пропан, бутан и др. попутные газы), а также анализ изменения (P , T) истечения двухфазного потока газовой смеси [8].

Приведем фрагменты расчета критических параметров сжиженного природного газа при течении его по трубопроводу в специальной термоизоляции. Данные для расчета, которые подробно представлены в работе [7], выбираются следующие: компонентный состав СПГ, плотность СПГ, газовый конденсат, компонентный состав нестабильного конденсата природного газа, плотность конденсата и его молекулярная масса.

$$T_{кр.см} = k_1 x_1 T_{крит 1} + k_2 (x_2 T_{крит 2} + x_n T_{крит n}), \quad (11)$$

$$T_{кр.см} = k_1 x_1 T_{крит 1} + k_2 x_{2-n} T_{крит 2-n}, \quad (12)$$

где x_1 , x_2 и x_n – массовые доли метана, этана и оставшихся n -компонентов (пропана, бутана, гексана и т. д.); $T_{крит 1}$, $T_{крит 2-4}$ и $T_{крит 5+}$ – критическая температура метана, этана и оставшихся n -смесей соответственно; k_1 , k_2 и k_n – поправочные коэффициенты, которые принимаются равными 1,0; 0,95 и 0,94 соответственно.

Далее выполняется расчет согласно разработанной модели для определения критических

где $\Delta CH_{4пр}$, $\Delta CH_{4эт}$ – разности начальных концентраций метана макрослоев в проектируемом и эталонном криобаке для СПГ;

$$k_{выс} = 1,3248 \frac{h_{пр}}{h_{эт}} - 0,3248, \quad (8)$$

где $h_{пр}$, $h_{эт}$ – высоты заполнения нижним слоем в проектируемом и эталонном криобаке для СПГ.

Выражения для определения коэффициентов справедливы в диапазонах изменения относительных определяющих параметров:

Последовательность расчета состоит из следующих позиций: 1) определение состава смесей углеводородов по заданным составам газа и газового конденсата при содержании нестабильного газового конденсата в смеси от 0 до 10 масс. % газа; 2) определение критических параметров метана в баке (критического давления и критической температуры) выполняются с использованием пакета прикладных программ или формул для расчета.

Газовую смесь метанового ряда делим на три составляющие: метан; этан, оставшиеся n -компоненты (пропан, бутан, гексан и т. д.). Расчет ведется из условия, что метан подается в сжиженном виде при заправке криобака СПГ на АГНКС. Температура, при которой любое дальнейшее повышение давления не может повлиять на сжижение газа, называется критической температурой. Соответственно данное давление, при котором происходит сжижение природного газа, называется критическим давлением. Таким образом, необходимо корректно определять в первую очередь критическую температуру данной газовой смеси метанового ряда. Критическую температуру смесей углеводородов в первом приближении можно вычислять по формуле

параметров пикового значения давления и критической температуры от степени увеличения теплопритока извне (окружающей среды), данная модель подробно представлена в работе [9].

Оптимизация показателей рабочих систем газового двигателя с целью повышения энергоэффективности представлена на рисунке 5.

С подробным описанием проведенных оптимизаций в отдельных системах по представ-

ленному рисунку 5 можно ознакомиться в статье [10], в данном случае можно отметить, что проделанные работы существенно улучшат

энергоэффективные показатели газового двигателя в процессе эксплуатации ТС.

Рисунок 5
Оптимизация показателей рабочих систем газового двигателя

Выводы. По результатам исследования можно отметить, что сжиженный метан имеет достаточно сложное физическое состояние при термодинамическом фазовом переходе от низких к высоким показателям температуры и давления. Математические модели, представленные выше и описанные в работе [5], дают возможность определить основные показатели отдельных элементов системы питания газового двигателя с целью оптимизации подачи сжиженного природного газа для улучшения топ-

ливо-экономических и экологических показателей без снижения мощности. Положительная сторона рассматриваемого вопроса состоит в том, что есть все основания для реализации поставленной цели при правильном подборе материалов для дальнейших опытно-конструкторских разработок экспериментальных образцов составных элементов системы питания газового двигателя, таких как криогенные баки, трубки и газовые форсунки [11, 12].

Библиографический список

1. Дидманидзе, О.Н. Надежность автотранспортных средств [Текст] / О.Н. Дидманидзе, Д.В. Варнаков, А.М. Карев. М.: Триада, 2017. 161 с.
2. Дидманидзе, О.Н. Транспортные и транспортно-технологические процессы [Текст] / О.Н. Дидманидзе, Д.Г. Асадов, А.М. Карев, Р.Н. Егоров, А.Н. Журилин. М.: Триада, 2016. 163 с.
3. Нигматулин, Р.И. Основы механики гетерогенных сред [Текст] / Р.И. Нигматулин. М.: Наука, 1978.
4. Патанкар, С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости

[Текст] / С. Патанкар; пер. с англ. М.: Энергоатомиздат, 1984.

5. Хакимов, Р.Т. Экспериментальные исследования процесса тепловыделения рабочего цикла газового двигателя с применением пьезоэлектрической форсунки [Текст] / Р.Т. Хакимов // Научное обеспечение развития АПК в условиях реформирования. Материалы научно-практической конференции профессорско-преподавательского состава. СПб: СПбГАУ, 2015. С. 605–608.

6. Хакимов, Р.Т. Анализ экспериментальных исследований рабочих процессов конвертируемых газовых двигателей [Текст] / Р.Т. Ха-

кимов // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. 2010. № 21. С. 297–302.

7. Хакимов, Р.Т. Влияние характеристик выгорания на показатели рабочего цикла газового двигателя при использовании электронной системы управления [Текст] / Р.Т. Хакимов // Грузовик. 2008. № 4. С. 27–29.

8. Prakash C., Patankar S.V. A control volume-based finite-element method for solving the Navie-Stokes equations using equal-order velocity-pressure interpolation. Numerical Heat Transfer. 1985. Vol. 8. P. 259.

9. Lee W., Baik Doo-Sung, Rogers T. and Petersen P. Study on Performance and Exhaust Gas Characteristics of Directly Injected CNG Engine. International Journal of Bio-Science and Bio-Technology. Vol. 6. No. 2 (2014). Pp. 179–186.

10. Габитов, И.И. Передовые технологии технического обслуживания и ремонта топливной аппаратуры дизелей [Текст] / И.И. Габитов, А.В. Неговора // Вестник Башкирского государственного аграрного университета. 2015. № 3 (35). С. 40–44.

11. Габитов, И.И. Устройство для исследования подачи топлива топливopодающей аппаратурой в дизелях [Текст] / И.И. Габитов, А.В. Неговора, А.Г. Габбасов, А.Р. Валиев, А.Ф. Давлетов // Патент на изобретение RUS 2433299 24.03.2010

12. Неговора, А.В. Специализированное устройство для исследования закона подачи топлива в системах питания дизелей [Текст] / А.В. Неговора, А.И. Низамутдинов, Р.Т. Хакимов. Техничко-технологические проблемы сервиса. 2014. № 3 (29). С. 11–13.

Сведения об авторах

1. **Дидманидзе Отари Назирович**, доктор технических наук, профессор, член-корреспондент РАН, ФГБОУ ВО Российский государственный аграрный университет им. К.А. Тимирязева, 127550, Россия, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49, e-mail: didmanidze@rgau-msha.ru.

2. **Хакимов Рамиль Тагирович**, кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО Санкт-Петербургский государственный аграрный университет, 196601, Россия, г. Санкт-Петербург, г. Пушкин, Петербургское шоссе, дом 2, e-mail: haki7@mail.ru.

3. **Неговора Андрей Владимирович**, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО Башкирский ГАУ, 450001, Россия, РБ, г. Уфа, ул. 50-летия Октября, 34, e-mail: negovora@bsau.ru.

В работе представлены основные преимущества и недостатки сжиженного природного газа в качестве моторного топлива, используемого в двигателях внутреннего сгорания. Особое внимание в статье уделяется исследованию критических показателей давления и температуры в топливopодающей системе газового двигателя и криобака, заправленного сжиженным метаном с теплоизоляцией, а также крити-

ческих параметров при истечении метана в специальных трубках круглого сечения с целью транспортировки газа в двухфазной среде. Представлены варианты схем подачи природного газа в топливopодающую систему газового двигателя на основе электронной системы управления с целью повышения энергоэффективности и улучшения эксплуатационных свойств.

O. Didmanidze, R. Khakimov, A. Negovora

IMPROVING PARAMETERS OF A POWER SUPPLY SYSTEM FOR A GAS ENGINE WITH LIQUEFIED METHANE

Key words: *gas engine; peak pressure; critical temperature; design volume; liquefied gas; two-phase flow.*

Authors' personal details

1. **Didmanidze Otari**, Doctor of technical sciences, professor, corresponding member of the Russian Science Academy, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Russian State Agrarian University named after K.A. Timiryazev, 127550, Russia, Moscow, Timiryazevskaya st., 49, e-mail: didmanidze@rgau-msha.ru.

2. **Khakimov Ramil**, Candidate of technical sciences, associate professor, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Saint-Petersburg State Agrarian University, 196601, Russia, St. Petersburg, Pushkin, Petersburg Highway 2, e-mail: haki7@mail.ru.

3. **Negovora Andrey**, Doctor of technical sciences, professor, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Bashkir State Agrarian University», 450001, Ufa, 50-letiya Ocyabrya St., 34, e-mail: negovora@bsau.ru.

The paper discusses the main advantages and drawbacks of liquefied natural gas as a motor fuel used in internal combustion engines. Special attention is paid to studies of critical indicators of pressure and temperature in the fuel-delivery system of the gas engine and a cryotank filled with liquefied methane with heat insulation as well as to critical

parameters of methane flow in special circular pipes to transfer the gas in the two-phase environment. There are schemes to supply natural gas to the fuel-delivery system of the gas engine based on an electronic control system in order to increase energy efficiency and improve operational properties.

© Дидманидзе О.Н., Хакимов Р.Т., Неговора А.В.

УДК 621.313.33

DOI: 10.31563/1684-7628-2018-46-2-100-105

И.Р. Кафиев, Р.Р. Нугуманов, Л.Р. Галлямова

ВЛИЯНИЕ НЕСИНУСОИДАЛЬНОСТИ НАПРЯЖЕНИЯ ИСТОЧНИКА ПИТАНИЯ НА НАДЕЖНОСТЬ ЛИНЕЙНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Ключевые слова: *схема замещения; математическая модель; несинусоидальность напряжения; линейный асинхронный двигатель; срок службы.*

Введение. В настоящее время наметилась тенденция расширения области применения в сельском хозяйстве электроприводов, построенных на базе линейных асинхронных двигателей (ЛАД). Достоинством данных двигателей является конструктивная простота, отсутствие электрического контакта со вторичным элементом, возможность получения большого диапазона линейных скоростей и перемещений без использования кинематических связей [1]. На базе линейных асинхронных электроприводов разработаны: инерционный конвейер, предназначенный для транспортирования сельскохозяйственных продуктов [2]; установка, которая может быть использована для сепарации зернового материала [3]; устройства для измельчения и помола зерновых культур [4, 5] и т. д. Несмотря на большое количество разработок на данную тему, вопросы надежности ЛАД, используемых в приводах сельскохозяйственных машин, мало изучены [6]. Это обстоятельство является одним из факторов, сдерживающих внедрение линейных электроприводов в производство. Поэтому большой интерес представляет исследование влияния несинусоидальности напряжения источника питания на срок службы ЛАД.

Цель исследования: оценка влияния несинусоидальности напряжения источника питания на срок службы ЛАД.

Задачи исследования: разработать математическую модель тепловых процессов в ЛАД и компьютерную программу в среде моделирования Matlab (Simulink), реализующую данную модель; определить моделированием температуру обмотки ЛАД при нормальных и ухуд-

шенных показателях качества электрической энергии; провести расчет относительного срока службы ЛАД при несинусоидальности питающего напряжения.

Условия, материалы и методы исследования. В качестве объекта исследования использован односторонний плоский ЛАД, используемый в приводе жерновой мельницы, схема которой приведена на рисунке 1. Основные параметры ЛАД: номинальное фазное напряжение – 220 В; частота сети – 50 Гц; количество фаз – 3; номинальная мощность – 4,0 кВт; габаритные размеры – 168 × 168 × 45 мм. Вторичный элемент (ВЭ) ЛАД является комбинированным, состоящим из неферромагнитного материала (алюминиевого диска) и ферромагнитного материала (стального диска). Наружный диаметр дисков составляет 0,7 м, внутренний диаметр – 0,36 м. Частота вращения ВЭ – 144 об/мин. Из анализа литературы по надежности электрических машин следует, что в подавляющем большинстве случаев (85...95 %) отказы вращающихся асинхронных двигателей связаны с повреждением изоляции обмоток, на подшипниковый узел приходится 5...8 % отказов, а небольшой процент связан с другими причинами [7]. Таким образом, надежность линейного асинхронного двигателя в основном будет определяться отказами обмоток индуктора, которые обусловлены тепловым старением изоляции.

При разработке математической модели тепловых процессов в ЛАД использован метод эквивалентных тепловых схем, сущность которого заключается в следующем [8]: двигатель разделяют на элементы, близкие или по мате-