

*И.А. Кожневникова, Т.Н. Кочнева, А.В. Кожневников, Н.В. Кочнев
Череповецкий государственный университет*

ОЦЕНКА ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКИ В УСЛОВИЯХ НЕСТАЦИОНАРНОГО ДИНАМИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ
в рамках научного проекта № 16-38-60042 мол_а_дк*

В статье проанализирована проблема нестационарности процесса и причин возникновения потерь электроэнергии при производстве листового проката. Рассмотрены результаты математической обработки экспериментальных данных по исследованию нестационарного характера токов якоря главных приводов рабочих клеток непрерывных станов холодной прокатки в рамках оценки негативного эффекта от потерь электроэнергии и определения направлений снижения производственных издержек, а также разработки технических мероприятий по минимизации уровня колебательных процессов при прокатке.

Автоматизированный электропривод, стан холодной прокатки, нестационарность технологического процесса, потери электроэнергии, энергоэффективность процесса прокатки.

The article analyzes the problem of non-stationary processes and causes of power losses in the process of production of sheet metal. The results of mathematical processing of the experimental data on the study of non-stationary nature of the currents of the armature of the main drives of working stands of continuous cold rolling mills within the assessment of the adverse effect of power loss and determination of the ways to reduce production costs, as well as the development of technical measures to minimize the level of vibration in the rolling process.

Automated electric drive, cold rolling mill, the unsteadiness of the technological process, loss of electricity, the energy efficiency of the rolling process.

Введение

В настоящее время для прокатного производства актуальными становятся задачи идентификации, выявления причин и устранения нестационарности технологического процесса прокатки, выражающегося в колебаниях основных технологических параметров, и являющимся основным условием возникновения нежелательных вибраций, зачастую носящих негативный характер при обработке металла в непрерывных станах холодной прокатки [1].

Другим следствием колебательных и негативных вибрационных процессов при прокатке холоднокатаной стали является возникновение потерь электроэнергии, причем наличие данного факта не всегда анализируется соответствующими специалистами и используется в рамках разработки мероприятий по снижению производственных издержек.

Решить проблему возникновения потерь электроэнергии (снизив их уровень) возможно с помощью исследования работы системы управления автоматизированными главными электроприводами рабочих клеток прокатных станов и оптимизацией настройки регуляторов приводов по критериям показателей качества переходных процессов и энергосбережения в установившихся и переходных режимах. Для этого необходимо статистически оценить существующий уровень потерь электроэнергии на прокатных станах.

Основная часть

Достижение высоких характеристик и показателей, которыми должны обладать современные машины и технологии в металлургии, невозможно без использования быстродействующих и точных систем

автоматического управления (САУ). Наиболее важными для автоматизации являются процессы обработки металлов давлением, осуществляемые на высокопроизводительном оборудовании в прокатном производстве, часто непрерывного действия. Самыми распространенными задачами, которые реализуются САУ, являются управление перемещениями исполнительных механизмов и рабочих органов машин, а также поддержание определяющих параметров технологического процесса обработки металла: натяжение, толщина металла и т.п. Одними из самых эффективных средств управления технологическими параметрами металлургических технических устройств, связанными с показателями выпускаемой продукции, являются электромеханические системы (ЭМС), в состав которых входят: преобразователь энергии, электродвигатель, механические передачи и исполнительный механизм. Поэтому к системам управления ЭМС предъявляются и самые высокие требования по показателям качества переходных и установившихся режимов [2].

В процессе прокатки в ЭМС возникают внешние возмущения. К ним могут относиться различные управляющие воздействия в сложных приводных системах, колебания многомассовых систем, выбор зазоров в механических передачах и т.д., приводящие к возникновению колебаний токов якоря. Высокие броски тока якоря главных приводов негативно влияют на энергоэффективность технологии, создавая потери электроэнергии, снижая надежность и к.п.д. электротехнического оборудования, ухудшая качество и повышая себестоимость выпускаемой продукции.

В настоящее время для основного большинства используемых в металлургии ЭМС характерно применение одноконтурных САУ с типовыми структурами П, ПИ, ПИД-регуляторов или систем подчиненного регулирования определяющих координат [3]. Для объектов, описываемых системой уравнений невысокого порядка, характеризующих малым быстродействием, отсутствием взаимного влияния параметров режима и колебательных характеристик, это является допустимым и позволяет проектировать САУ, отвечающие приемлемым технологическим требованиям. Применение таких систем возможно и для сложных систем, но при низких технических требованиях к показателям процессов управления.

Одними из перспективных методов синтеза САУ, используемых в автоматизации металлургических процессов, являются системы, характеризующиеся широкими возможностями при обеспечении желаемых показателей качества: повышение быстродействия, устранение колебательности при наличии упругости и люфтов в кинематических связях. В связи с этим в последнее время вопросы анализа и синтеза САУ электроприводов, оптимизация их характеристик становятся все более актуальными [4].

Однако применение типовых законов регулирования в системах с нежесткой механикой дает неудовлетворительные результаты. Так, при использовании типовых регуляторов тока и скорости в электроприводе рабочих валков пятиклетевого прокатного стана отсутствует стабилизация определяющих параметров и возникают значительные незатухающие пульсации тока (см. рис. 1), достигающие 60–80 % от установившегося значения.

Зашумленность сигнала тока якоря, представленного на рис. 1, говорит о наличии потерь электроэнергии и необходимости их анализа и учета для оценки эффективности технологического процесса, как в рамках проектирования технологии, так и при ее оптимизации на действующих производствах.

Потери тока якоря можно разделить на:

- потери, возникающие при выполнении полезной работы;
- «паразитные» потери, к уменьшению которых необходимо стремиться.

Современные методы математического моделирования позволяют достаточно точно выделить из имеющихся данных колебательные процессы, не имеющие отношения к выполнению полезной работы.

Исходя из вышесказанного, актуальны следующие задачи:

- 1) повышение стабильности и энергоэффективности технологии прокатки стальных листов и полос;
- 2) статистическая оценка потерь мощности и энергии при работе автоматизированных приводов прокатных станов, разработка мероприятий по их снижению.

Для оценки уровня потерь энергии от колебательных процессов при пульсациях тока якоря необходимо оценить их статистическое среднеквадратичное отклонение от среднего тока, характеризующего рабочие режимные характеристики электроприводов рабочих клеток, при этом необходимо учитывать, что уровень «паразитных» потерь зависит не только

от квадрата величины тока колебательных процессов, но и пропорционален величине тока полезного процесса.

$$W_K = R \left(\int_0^t I_K^2(t) dt + 2 \int_0^t I_K(t) I_{II}(t) dt \right),$$

где I_{II} – ток, потребляемый для выполнения полезной работы, I_K – ток колебательных процессов. R – суммарное сопротивление цепи якоря электропривода рабочего валка, t – время прокатки (дискретной выборки).

Однако так как ток колебательного процесса практически равномерно отклоняется от величины тока полезного процесса, то эти отклонения стремятся скомпенсировать друг друга, и второе слагаемое стремится к нулю. Таким образом, для оценки уровня потерь от колебательных процессов достаточно оценить амплитуду отклонения от тока полезного процесса и рассчитать их по следующей формуле [5]:

$$W_K \approx R \int_0^t I_K^2(t) dt. \quad (1)$$

Для статистического анализа режимов работы электроприводов рабочих валков прокатного стана использовано программное обеспечение *ibaAnalyser*. Исследована дискретная выборка токов якорей электроприводов верхнего (ВВ) и нижнего (НВ) валков клеток №1–5 пятиклетевого стана «1700» ЧерМК ПАО «Северсталь» при прокатке группы рулонов автомобильной стали.

Технические и технологические характеристики оборудования:

- электродвигатель привода рабочего валка: двухякорный серии 2П2-19/60-4УХЛЗ, 2х2000 кВт, 930 В, 175/400 об./мин, 2х2300 А, ПВ=100 %, $R_{\Sigma}=2 \times 0,02415 \text{ Ом}$;
- комплектный тиристорный преобразователь: КПТТК-1000/1250-2х6900/2х3-450-2/1, 1250 В, 6900 А;
- партия 9 рулонов автостали: ширина 1315 мм, толщина 1 мм, вес – 16–24 т, среднее время намотки рулона – 441 с;
- дискретность всей выборки: 3600 с с шагом 0,01 с.

Характерные участки графиков токов якорных цепей электроприводов валков 1 и 5 клеток приведены на рис. 2.

Согласно рис. 1, 2 определены следующие параметры нестационарного динамического нагружения при холодной прокатке:

- броски токов якоря при разгонах полосы могут достигать 400–500 А;
- средний уровень колебаний токов якоря главных приводов рабочих клеток при постоянной скорости прокатки 200–300 А.

2) Статистические показатели токов якоря всех валков клеток приведены в табл. 1.

Для оценки потерь мощности и энергии в элементах силовой части электроприводов используем выражение (1), результаты в расчете на тонну металла сведен в табл. 2.

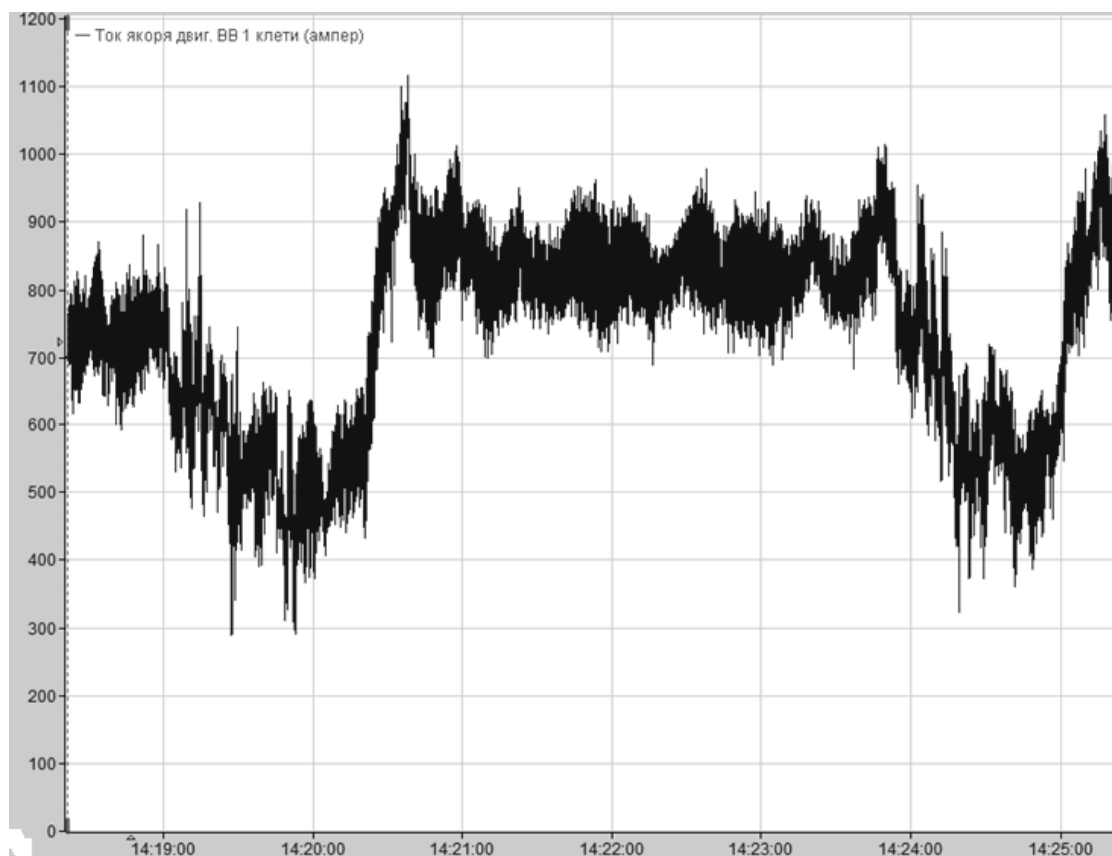


Рис. 1. Осциллограмма тока якоря электропривода верхнего валка клетки №1

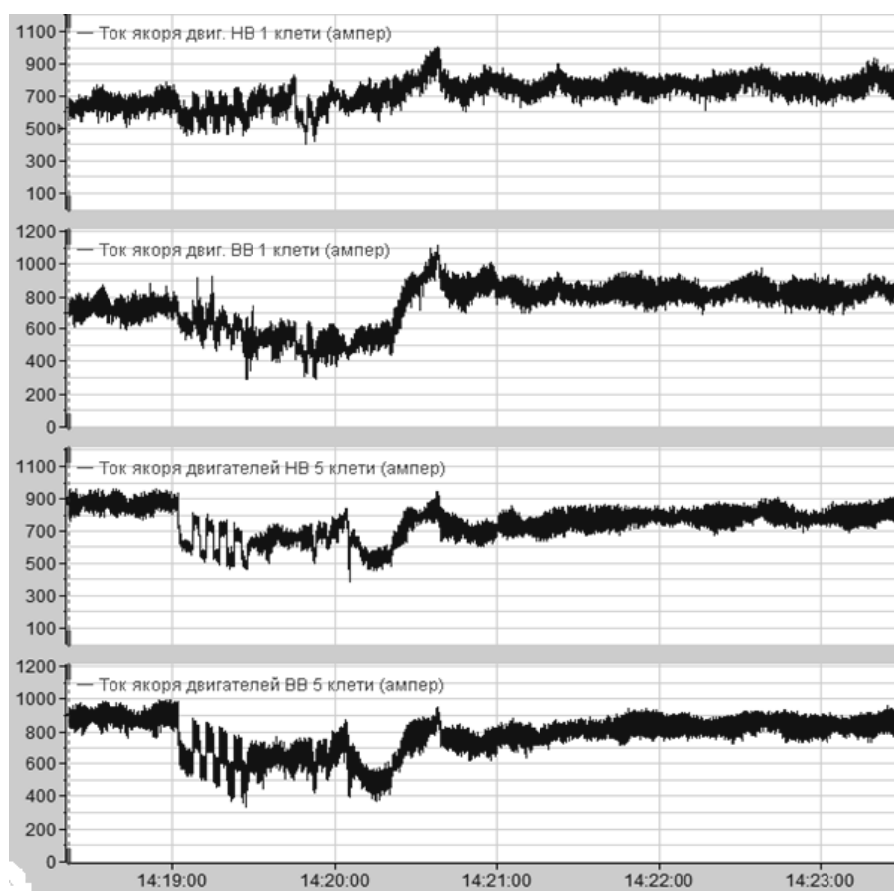


Рис. 2. Графики тока якоря электропривода нижнего и верхнего валков клеток 1 и 5 5-клетевого стана холодной прокатки «1700» ПАО «Северсталь»

Таблица 1

Статистические показатели режимов работы якорных цепей электропривода

Параметр режима	Минимальное значение	Максимальное значение	Среднее в выборке значение	Статистическое среднеквадратичное отклонение
Ток якоря двигателей НВ 1 клетки, А	-55,74	1445,60	812,882	264,067
Ток якоря двигателей ВВ 1 клетки, А	-36,65	1404,95	798,166	259,050
Ток якоря двигателей НВ 2 клетки, А	-45,10	2106,01	1159,133	399,682
Ток якоря двигателей ВВ 2 клетки, А	-104,70	2163,53	1110,307	331,111
Ток якоря двигателей НВ 3 клетки, А	-35,13	2541,75	1414,569	457,541
Ток якоря двигателей ВВ 3 клетки, А	-8,40	2477,78	1434,906	463,637
Ток якоря двигателей НВ 4 клетки, А	-35,87	2752,97	1442,227	499,464
Ток якоря двигателей ВВ 4 клетки, А	-18,32	2792,35	1449,977	514,500
Ток якоря двигателей НВ 5 клетки, А	-894,69	1374,50	747,555	277,858
Ток якоря двигателей ВВ 5 клетки, А	-884,22	1364,18	736,689	288,610

Таблица 2

Энергетические показатели режимов работы якорных цепей электропривода

Рабочий валок НВ – нижний, ВВ – верхний	Потери мощности, кВт	Удельные потери электроэнергии, кВт·ч/т
Электропривод НВ 1 клетки	33,68026	0,164025
Электропривод ВВ 1 клетки	32,41263	0,157852
Электропривод НВ 2 клетки	77,15717	0,37576
Электропривод ВВ 2 клетки	52,95346	0,257887
Электропривод НВ 3 клетки	101,113	0,492427
Электропривод ВВ 3 клетки	103,8253	0,505636
Электропривод НВ 4 клетки	120,4913	0,5868
Электропривод ВВ 4 клетки	127,8551	0,622662
Электропривод НВ 5 клетки	37,29005	0,181605
Электропривод ВВ 5 клетки	40,23184	0,195932
Всего	727,0101	3,540586

Современными исследованиями доказано, что применение быстродействующих САУ на базе существующих интеллектуальных информационных технологий [6], [7] даст возможность эффективного гашения пульсаций тока якоря и позволит существенно повысить энергоэффективность автоматизированных электроприводов.

При проектной производительности стана 1600000 т в год и средней стоимости электроэнергии 2 руб/кВт·ч ожидаемая экономия составит $3,54 \cdot 1600000 \cdot 2 = 11,33$ млн руб. в год.

Выводы:

1. Проведен статистический анализ и расчет потерь мощности и электроэнергии с учетом нестационарного характера режимов работы автоматизированных приводов листовых прокатных станов.
2. Проведена оценка энергозатрат от возникновения потерь электроэнергии на 5-клетевом стане 1700 Череповецкого металлургического комбината ПАО «Северсталь».
3. Использование разработанного метода расчета потерь электроэнергии может помочь специалистам прокатного производства в решении задач повышения энергоэффективности и стабильности технологического процесса прокатки.

Литература

1. Кожевников А.В., Сорокин Г.А. Пути снижения потерь электроэнергии при работе автоматизированных при-

водов прокатных станов // Проблемы черной металлургии и материаловедения. 2012. №4. С. 79–85.

2. Гудвин Г.К., Гребен С.Ф., Сальгадо М.Э. Проектирование систем управления. М., 2004. 911 с.

3. Панкратов В.В., Нос О.В. Специальные разделы теории автоматического управления: Ч. 1. Модальное управление и наблюдатели. Новосибирск, 2011. 248 с.

4. Современная прикладная теория управления: Новые классы регуляторов технических систем. Таганрог, 2000. Ч. III. 656 с.

5. Кожевников А.В., Сорокин Г.А. Метод расчета потерь электроэнергии от вынужденных колебаний тока якоря двигателя при работе приводов листовых прокатных станов // Производство проката. 2014. №6. С. 19–23.

6. Кожевников А.В., Волков В.Н. Разработка функции самонастройки системы управления электроприводом на базе генетического алгоритма // Автоматизация и современные технологии. 2015. №2. С. 41–45.

7. Кочнева Т.Н., Кожевников А.В., Кочнев Н.В. Синтез модального регулятора и оценка эффективности модального управления для двухмассовых электромеханических систем // Вестник Череповецкого государственного университета. Череповец, 2013. № 4 (52). Т. 2. С. 15–22.

References

1. Kozhevnikov A.V., Sorokin G.A. Puti snizheniia poter' jelektroenergii pri rabote avtomatizirovannyh privodov prokatnyh stanov [Ways to reduce energy losses in the drive automated rolling mills]. *Problemy chernoi metallurgii i materialovedeniia* [Problems of ferrous metallurgy and materials science], 2012, №4, pp. 79–85.

2. Gudvin G.K., Grebe S.F., Sal'gado M.Ie. *Proektirovanie sistem upravleniia* [Design of Control Systems]. Moscow, 2004, 911 p.

3. Pankratov V.V., Nos O.V. *Special'nye razdely teorii avtomaticheskogo upravleniia: Ch. 1. Modal'noe upravlenie i nabludatel'i* [Special sections of the automatic control theory: Part 1. Modal control and observers]. Novosibirsk, 2011, 248 p.

4. *Sovremennaiia prikladnaia teoriia upravleniia: Nove klassy regulatorov tekhnicheskikh sistem* [Modern Applied Control Theory: New classes of technical systems regulators]. Taganrog, 2000. Ch. III, 656 p.

5. Kozhevnikov A.V., Sorokin G.A. Metod rascheta poter' elektroenergii ot vynuzhennykh kolebaniy toka iakoria dvigate- lia pri rabote privodov listovykh prokatnykh stanov [The method of calculation of power losses from the forced oscillations of current motor armature with the drive of sheet mills] *Proiz-*

vodstvo prokata [Production of rolled products], 2014, №6, pp. 19–23.

6. Kozhevnikov A.V., Volkov V.N. Razrabotka funktsii samonastroiki sistemy upravleniia elektroprivodom na baze geneticheskogo algoritma [The method of calculation of power losses from the forced oscillations of current motor armature with the drive of sheet mills]. *Avtomatizatsiia i sovremennye tekhnologii* [Production of rolled products], 2015, №2, pp. 41–45.

7. Kochneva T.N., Kozhevnikov A.V., Kochnev N.V. Sintez modal'nogo regul'atora i ocenka effektivnosti modal'nogo upravleniia dlia dvumassovykh elektromekhanicheskikh sistem [Synthesis of modal control and evaluation of modal control for a two-mass electromechanical systems]. *Vestnik Cherepoveckogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of Cherepovets State University]. Cherepovets, 2013, № 4 (52), T. 2, pp. 15–22.

УДК 662.6/9

В.К. Любов, А.Н. Попов, А.Е. Ивуть, С.О. Кондаков, Н.И. Седлецкий
Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова
(Архангельск)

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ОТХОДОВ ФАНЕРНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Древесина и побочные продукты ее обработки и переработки являются возобновляемым источником энергии с нейтральным уровнем эмиссии углерода и могут быть эффективно использованы в решении энергетических проблем. В данной работе представлены результаты комплексного энергетического обследования основного и вспомогательного оборудования парового котельного агрегата мощностью 22 МВт. В топке котлоагрегата, оборудованной наклонно-переталкивающей решеткой, реализована трехступенчатая схема сжигания, обеспечившая эффективное энергетическое использование отходов фанерного производства. Выполнен анализ конструктивных особенностей установленного котлоагрегата, определены составляющие теплового баланса, исследованы выбросы оксидов азота, углерода и твердых частиц.

Котельная установка, топливо, вредные вещества, топка, система автоматики, золоуловитель, потери тепла.

Wood and byproducts of wood processing are renewable energy sources which are carbon-neutral and may be effectively used in solving of energy problems. This paper presents the results of comprehensive energy examination of the main and auxiliary equipment of steam boiler of 22 MW capacity. In the furnace of the boiler equipped with reciprocating grate a three-stage combustion scheme was implemented to ensure effective energy use of wastes from plywood production. Boiler design features were analyzed, components of heat balance were calculated, emissions of nitrogen oxides, carbon oxides and particulate pollutant were examined.

Boiler plant, fuel, harmful substances, furnace, automation system, ash collector, heat losses.

Введение

Побочные продукты, образующиеся на всех этапах технологических процессов обработки и переработки древесины, могут быть промышленно использованы в различных направлениях без нарушения экологического равновесия. Поэтому в индустриально развитых странах для уменьшения воздействия «парниковых» газов на климат планеты активно поощряется замена ископаемых топлив биотопливом.

Основная часть

Для снижения себестоимости тепловой энергии, уменьшения влияния факторов внешней среды на устойчивость и стабильность развития предприятия и для комплексного снижения выбросов вредных веществ в окружающую среду в ЗАО «Архангельский фанерный завод» в 2015 году был смонтирован и запущен в работу котлоагрегат PRD 22000 австрийской фирмы “Polytechnik Luft- und Feuerung-

stechnik GmbH”. Котлоагрегат установлен в индивидуальной производственной котельной, предназначенной для обеспечения паром технологического цикла фанерного производства, оборудован индивидуальной дымовой трубой высотой 34 м и автоматической системой управления всеми процессами. Котлоагрегат рассчитан на выработку насыщенного пара с рабочим давлением 1,2 МПа, его номинальная паропроизводительность составляет 34,0 т/ч.

Топливом для котлоагрегата является смесь, состоящая из дробленки фанеры, березовой коры, древесно-шлифовальной пыли (ДШП), опилок от обработки фанеры и шпона. Компоненты данной топливной смеси значительно различаются как по теплотехническим характеристикам (влажности, зольности, теплотворной способности), так и по технологическим показателям (сыпучести, взрывоопасности), но особенно сильно гранулометрическим составом [1]. Размеры частиц в данной топливной смеси раз-