

Когенерационные установки и их специфика работы с потребителем

А.В. Разуваев

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Обоснование. Работа посвящена актуальности вопроса развития всех отраслей экономики нашей страны в том числе и такой важной отрасли как сельское хозяйство. Развитие сельскохозяйственной отрасли связано в отдельных случаях с её некоторой спецификой, которая заключается в необходимости (а иногда сложившийся исторически) иметь автономные и удалённые объекты сельскохозяйственного производства. При этом производственные объекты и жилье обслуживающих специалистов вынужденно находятся на некотором удалении от источников центрального (или основного) электро- и теплоснабжения.

Цель работы — обоснование применения когенерационных установок на базе двигателя внутреннего сгорания с учётом их работы совместно с потребителем и, соответственно, с выработкой электрической и тепловой энергии.

Методы. Показано, что выработка тепловой энергии в когенерационной установке зависит от величины электрической нагрузки, что, несомненно, необходимо учитывать.

Результаты. Представлен алгоритм расчёта когенерационной установки с потребителем на стадии проектной разработки и подбора необходимого оборудования для её комплектования и последующей реализации.

Заключение. На основании проведённого анализа сделаны конкретные выводы для реализации когенерационных установок на различных объектах, как для инвесторов, так и для производителей когенерационных установок на базе двигателей внутреннего сгорания

Ключевые слова: когенерационная установка; система утилизации; двигатель внутреннего сгорания; потребитель энергоресурсов.

КАК ЦИТИРОВАТЬ:

Разуваев А.В. Когенерационные установки и их специфика работы с потребителем // Тракторы и сельхозмашины. 2025. Т. 92, № 4. С. **х-у**. DOI: 10.17816/0321-4443-635865 EDN: PCFNXO

Cogeneration Plants and Specific Features of Their Operation with the Consumer

Aleksander V. Razuvaev

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

ABSTRACT

BACKGROUND: The paper considers relevance of the issue of development of all sectors of the national economy, including such an important industry as agriculture. The development of the agricultural industry is associated in some cases with some of its specific features, which involve the necessity (sometimes historically developed) to have autonomous and remote objects of agricultural production. At the same time, production facilities and housing of service specialists are forced to be located at some distance from the sources of central (or main) electricity and heat supply.

AIM: Justification of the use of cogeneration plants based on an internal combustion engine is given, taking into account their operation together with the consumer and, accordingly, the generation of electric and thermal energy

MATERIALS AND METHODS: It is shown that the generation of thermal energy in a cogeneration plant depends on the value of the electric load and thereby this fact must be taken into account.

RESULTS: An algorithm for design analysis of a cogeneration plant with a consumer at the stage of design development and selection of the necessary equipment for its completion and subsequent implementation is presented.

CONCLUSION: Based on the analysis, specific conclusions are made for the implementation of cogeneration plants at various facilities, both for investors and for manufacturers of cogeneration plants based on internal combustion engines

Keywords: cogeneration plant; utilization system, internal combustion engine, energy consumer.

TO CITE THIS ARTICLE:

Razuvaev AV. Cogeneration Plants and Specific Features of Their Operation with the Consumer. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2025;92(4):x-y. DOI: 10.17816/0321-4443-635865 EDN: PCFNXO

ОБОСНОВАНИЕ

Работа посвящена актуальности вопроса развития всех отраслей экономики нашей страны в том числе и такой важной отрасли, как сельское хозяйство. Развитие этой отрасли связано в отдельных случаях с некоторой спецификой, которая заключается в необходимости (а иногда и исторически сложилось) иметь автономные и удаленные объекты сельскохозяйственного производства. При этом производственные объекты и жилье обслуживающих специалистов вынужденно находятся на некотором удалении от источников центрального (или основного) электро- и теплоснабжения. Это могут быть отдельные фермерские хозяйства или специализированные автономные подразделения крупного предприятия. К ним могут относиться автономные заготовительные предприятия и организации.

На протяжении всей истории человечества происходило совершенствование и развитие источников и видов энергии, используемой в производстве и в быту. В последние десятилетия существенно изменились экономические условия эксплуатации теплофикационных систем: увеличилась стоимость топливно-энергетических ресурсов, ужесточились требования к уровню тепловых потерь в системах транспорта теплоты, повысились требования к качеству теплоснабжения потребителей, возросла роль местного регулирования систем теплопотребления, изменились методики оценки экономической эффективности теплофикационных систем. Поэтому, необходимо пересмотреть саму структуру выбора работы современных систем теплоснабжения. Это обусловлено как опытом зарубежных стран, показавшим огромные возможности совершенствования систем теплоснабжения, так и кардинально изменившимися экономическими условиями [1, 2].

Потребителей тепловой энергии, вполне естественно, интересуют вопросы организации экономичного режима теплопотребления. Сегодня эти проблемы актуальны, поскольку очевидна общая тенденция приближения цен и тарифов на энергоносители к мировым. Несмотря на высокую эффективность комбинированного производства тепловой и электрической энергии на ТЭЦ, доля теплофикации в общей выработке тепловой энергии в России снижается. Связано это, прежде всего, с тем, что отечественные системы теплоснабжения эксплуатируются на основе устаревших и малоэффективных технологий, прежде всего — технологий регулирования отпуска теплоты и обеспечения пиковой мощности. Действующие системы централизованного теплоснабжения, как правило, имеют традиционную структуру, состоящую из теплоисточника, тепловой сети и потребителя. Эта структура была разработана в 1950-е гг. и существенно не изменялась с момента своего появления.

За прошедшее с тех пор время многие заложенные в основу проектов теплоисточников, систем транспорта теплоты и теплоиспользующих систем концептуальные технические и технологические решения устарели. Это приводит к тому, что тепловая и электрическая энергия, поставляемые от ТЭЦ, нередко стоят дороже, чем энергоресурсы, предлагаемые раздельными энергоисточниками.

В условиях рыночной экономики потребители органического топлива заинтересованы в рациональном его использовании. По этой причине в последнее время уделяется значительное внимание утилизации вторичных энергетических ресурсов. Утилизация вторичных энергетических ресурсов позволяет полезно использовать тепло отработавших пара, воды, сгоревших газов и т.п.

В связи с имеющим износом энергетического оборудования, производящего электрическую и тепловую энергию централизованно, в последнее время много внимания, уделяется строительству локальных источников энергии. Последние создаются в основном на базе поршневых или газотурбинных двигателей. Если наряду с электрической энергией, производимой, например, газовым двигатель-генератором (ГДГ) потребитель, создавая систему утилизации тепла (СУ), использует и тепловую энергию, то речь идет о когенерационной установке (КУ) в составе ГДГ и СУ.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Данная работа позволяет рассчитать возможную экономию от утилизации сгоревшего топлива и сделать вывод о целесообразности строительства локального источника энергии с системой утилизации вторичных энергетических ресурсов еще на этапе предварительного планирования строительства. При этом учитывается и специфика работы КУ и потребителя.

МЕТОДЫ

Система отопления должна покрывать потери тепла (теплопотери) помещениями через ограждающие конструкции, т.е. через стены, окна, двери, пол, потолок. Эти теплопотери неизбежны, когда температура внутри помещения выше температуры наружного воздуха или смежных помещений. Размеры этих потерь зависят от коэффициента теплопередачи материала ограждения, площади ограждающих конструкций, соприкасающихся с наружным воздухом, и разности температур воздуха внутри помещения и снаружи.

В общем виде количество тепла, ккал/ч, передаваемого через плоскую стенку из более нагретого помещения,

$$Q = k \times F \times (t_g - t_n), \quad (1)$$

где k — коэффициент теплопередачи через стенку, ккал/ч м² °C; F — площадь стенки, м²; t_g и t_n — соответственно температура внутри помещения и наружного воздуха, °C.

Теплопотери здания при этом вычислены по соответствующим формулам для различных видов гражданских и промышленных зданий, в которых учтены материалы стен, их размеры, географическое расположение здания, а также определены по формулам с учётом степени остекления наружных стен здания, площадь наружных стен, входных проёмов и т.д. Однако такой расчёт довольно трудоёмок.

Учитывая, что требуется как, правило, минимальное время для ответа делать или не делать данный (например, проект по установки КУ) проект, становится актуальным вопрос по сокращению этого времени.

Поэтому расчёт теплопотерь для объекта, что необходимую теплоту для объекта-потребителя или их группы, обозначенную как $Q_{номп}$ можно рассчитать с достаточной точностью по формуле:

$$Q_{номп} = q_o \times (t_g - t_n) \times V \times a, \quad (2)$$

где $Q_{потр}$ — теплопотери потребителем (объектом), ккал/ч; (при наличии группы потребителей берётся сумма теплопотерь от этих потребителей); q_o — удельная тепловая характеристика, ккал/ч м³ °C (берётся из соответствующих документов) оценочно из табл. 1; V — объём здания потребителя, м³ (по наружному обмеру определяется расчётом); a — коэффициент, учитывающий изменение удельной тепловой характеристики зданий в зависимости от расчётной температуры наружного воздуха, (оценочно из табл. 2); t_g — температура внутри помещения °C, зависит от назначению помещения (жилое, производственное и т.д.) и берётся из соответствующих документов (оценочно из табл. 3); t_n — температура наружного воздуха °C, зависит от климатической зоны эксплуатации помещения и берётся из документов по климатологии (оценочно из табл. 4).

Температура воздуха внутри помещений должна поддерживаться и обеспечивать хорошее самочувствие находящихся в них людей. Расчётная температура воздуха помещений строго регламентируется действующими СНиПами и зависит от назначения помещения [3].

Таблица 1. Усреднённые удельные тепловые характеристики жилых и общественных зданий при расчетной температуре наружного воздуха — 30 °C, ккал/(ч м³ °C)

Table 1. Average specific thermal characteristics of residential and public buildings at the design outdoor temperature: 30 °C, kcal/(h m³ °C)

Число этажей	Время застройки		
	До 1955 г.	После 1955 г.	С конца первой половины 70-х гг.
1	0,60	0,90	0,70
2-3 (малоэтажная застройка)	0,37	0,48	0,45
4-5 (многоэтажная застройка)	0,30	0,40	0,37
6 и выше (повышенная)	0,27	0,40	0,35

T

аблица 2. Значения коэффициента «а»

Table 2. Values of the "a" coefficient

Отрицательна температура наружного воздуха, °С	Время застройки	
	до 1962 г.	после 1962 г.
10	1,45	1,2
15	1,29	1,15
20	1,17	1,10
25	1,08	1,05
30	1,0	
35	0,95	
40	0,90	
45	0,85	0,90
50	0,82	0,90

Таблица 3. Температуры воздуха внутри помещения, зависящие от назначения помещения, °С

Table 3. Inside temperatures inside the room, depending on the purpose of the room, °С

Название объекта	Тем-ра, °С
Жилые, гостиницы, общежития	18
Административные, научно-исследовательские и проектные институты	18
Поликлиники, амбулатории, больницы	20
Клубы, дома культуры	16
Кинотеатры	14
Театры	15
Предприятия общественного питания	16
Магазины	15
Учебные заведения, школы, лаборатории	16
Детские сады и ясли	20
Пожарные депо, прачечные	15
Бани	25
Гаражи	10

Таблица 4. Усреднённые климатические данные по основным экономическим районам

Table 4. Average climatic data for the main economic regions

Наименование района	Температура воздуха наиболее холодной пятидневки, оС	Продолжительность отопительного периода, сутки
Северо-Западный	27,0	243
Центральный	26,1	214
Волго-Вятский	28,8	219
Центральный чернозёмный	25,2	199
Поволжский	29,0	207
Северо-Кавказский	16,9	161
Уральский	32,7	228
Западно-Сибирский	38,3	238
Восточно-Сибирский	43,4	262
Дальневосточный	30,0	238

Уточнённые данные по представленным параметрам можно сверить по соответствующему стандарту — климатология или по метеорологическим данным в конкретном районе.

Таким образом, пользуясь приведёнными выше данными, можно подсчитать теплопотери отдельными зданиями, что даёт возможность подобрать необходимые по теплопроизводительности нагревательные приборы.

Таким образом можно определить величину теплоты, необходимую для потребителя (здания или группы зданий). Далее необходимо узнать тепловые «возможности» КУ. Они определяются с учетом специфики работы КУ и потребителя, которая заключается в том, что вырабатываемая теплота КУ от ДГ (или ГДГ) зависит от электрической мощности поршневого двигателя, т.е. с увеличением электрической нагрузки на ДВС увеличивается и величина вырабатываемой тепловой мощности СУ. При этом максимальная величина тепловой мощности соответствует номинальной электрической мощности КУ.

Тепло $Q_{ку}$, которое можно получить от когенерационной установки в составе ДГ и СУ определяется как

$$Q_{ку} = Q_{м} + Q_{охл} + Q_{г} , \quad (3)$$

где $Q_{ку}$ — суммарная величина теплоты от СУ КУ; Q_m — количество теплоты утилизируемой от масла ДВС; $Q_{охл}$ — количество теплоты утилизируемой от охлаждающей жидкости ДВС; Q_e — количество теплоты утилизируемой от выхлопных газов ДВС.

Имея график электрических нагрузок на КУ (представлен на рис. 1), определим количество тепла, вырабатываемое системой утилизации за этот промежуток времени. На i -итом режиме работы КУ мы имеем — количества тепла в зависимости от электрической нагрузки:

$$Q_{ку}^i = Q_m^i + Q_{охл}^i + Q_e^i \quad (4)$$

Тогда, суммарное количество тепла на i -итом режиме работы КУ определим как:

$$\sum Q_{ку}^i = \sum (Q_m^i + Q_{охл}^i + Q_e^i) \quad (5)$$

Зная или прогнозируя температуру наружного воздуха, величину теплопотерь здания в определённый отрезок времени, изменение электрической нагрузки на КУ, тогда имеется возможность рассчитать и сравнить величины необходимой теплоты потребителю и вырабатываемую теплоту от СУ КУ. Данная отводимая теплота от КУ должно использоваться в первую очередь и если ее не хватает для отопления конкретного объекта, то необходимо иметь дополнительный источник тепла — пиковый котёл. Об этом было более подробно рассмотрено в статье «Расширение возможности работы когенерационных установок», опубликованной в данном журнале, но номерами ранее. Кроме этого, используя программный продукт [4] можно провести анализ таких расчётов, но для вполне конкретной КУ с дизель-генератором мощностью 630 кВт и двигателем 6ЧН 21/21.



Рис. 1. Изменение электрической и тепловой нагрузки двигателя-генератора в течение суток (условный пример):

_____ электрическая нагрузка дизель – генератора;
 - - - - - тепловая нагрузка системы утилизации.

Fig. 1. Change in the electric and thermal load of the engine-generator during the day (conditional example):

_____ electrical load of a diesel generator;
 - - - - - heat load of the waste heat recovery system.

В [5] приведены режимы работы различных энергетических установок, в том числе и дизель-генераторов различного назначения.

В составе КУ с двигателем-генератором 6ЧН 21/21 электрической мощностью 500 кВт можно получить такую же величину тепловой мощности. В состав СУ этой КУ входит блок утилизации компоновка и общий вид которого представлена на рис. 2, а общий вид КУ на объекте эксплуатации представлена на рис. 3.

Более подробные и детальные проработки КУ с двигателем 6ЧН21/21, мощностью 500 кВт газового и дизельного 520 кВт, позволяющих повысить их эффективность применения представлено в работе [6].

ТЕОРИЯ, КОНСТРУИРОВАНИЕ, ИСПЫТАНИЯ

С целью расширения возможности применения когенерационных установок на объекте дано в работах [7, 8], где описана возможность и при необходимости возможна установка дополнительного источника теплоты в составе КУ с целью обеспечения необходимой величиной теплоты для отопления потребителя.

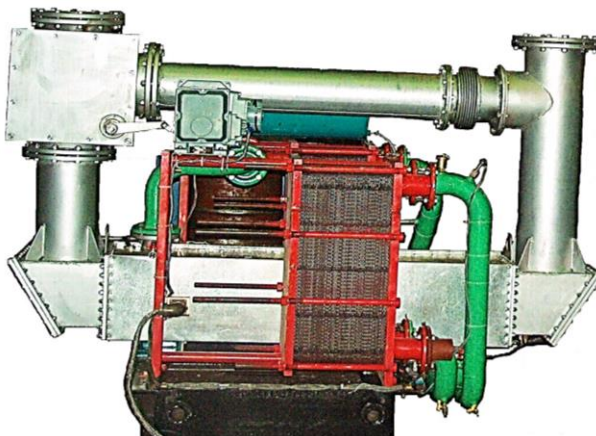


Рис. 2. Компоновка блока утилизации теплоты ГДГ 500.

Fig. 2. Layout of the GDG 500 heat recovery unit.



Рис. 3. Общий вид газового двигатель-генератора с блоком утилизации теплоты на объекте эксплуатации.

Fig. 3. General view of the gas engine-generator with a heat recovery unit at the site of operation.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Таким образом, разработанный алгоритм расчёта теплоты совместной работы КУ и потребителя с учётом специфики работы КУ в составе ДГ (или ГДГ) и СУ, переведённый на ЭВМ, для обеспечения объекта теплом от системы утилизации тепла КУ позволяет:

- значительно сократить время расчёта (оценочно на 60% времени) обеспечения объекта теплом от системы утилизации тепла ДГ (или ГДГ). Кроме этого, также изменяя параметры, входящие в этот расчёт: как расход, температуры входа и выхода нагреваемого теплоносителя, даёт возможность подобрать оптимальные параметры теплообменного оборудования, входящего в СУ;
- получить исходные данные для заказа (расчёта) теплообменного оборудования, входящего в СУ, а именно параметры (расход, температура входа и выхода) греющего и нагреваемого теплоносителя;
- ввести в алгоритм системы автоматики приоритетность использования тепла от СУ т.е. в первую очередь использовать максимально возможную теплоту от утилизации

вторичной отводящей с выхлопными газами, охлаждающей жидкостью и при необходимости с маслом теплоты от ДВС и только после этого использовать теплоту дополнительного источника тепла в виде водогрейного котла для обеспечения комфортных условий потребителя по теплоснабжению;

- разработать детальный алгоритм и техническое задание на систему автоматики КУ в составе поршневого ДВС и его СУ, непосредственно связанных с объектом потребления тепла;
- рассчитать экономический эффект на стадии предварительных (или оценочных) проектных предложений или разработки бизнес плана от применения КУ в составе поршневого ДВС и СУ для отопления объекта потребителя либо использовать теплоту для других нужд (например, технологических или производственных) с учётом климатической зоны эксплуатации объекта и реальных режимов работы ДГ на этом объекте по электрические нагрузки с учетом работы, где и рассматривается этот вопрос [9];
- ожидаемый экономический эффект от применения КУ на объекте (объектах) основан на том, что использование «дармовой», проще говоря, бросовой теплоты, вырабатываемой в КУ и применяемой для отопления объекта. При этом в этот период не затрачивается дополнительное топливо необходимое для отопления этого объекта. Зная вид, объём не затраченного дополнительного топлива и его стоимость, позволяет рассчитать экономию денежных средств от не закупленного топлива. Эта величина и может считаться экономическим эффектом от применения КУ.
- применение КУ на базе дизельного или газового двигателя на различных объектах, в том числе и объектах агропромышленного комплекса с учётом его специфики даст реальную экономию топливно-энергетических ресурсов, что и отвечает современным требованиям энергоэффективности.

Отдельным выводом (рекомендацией) является возможность определить необходимость обеспечения ответственных объектов резервными источником электроэнергии на базе дизель-генераторов. Это же относится и к объектам расположенным там, где часто отключается электроэнергия. Применение ДГ в качестве резервного источника электроэнергии для объекта, но уже без использования системы утилизации, т.к. в этом случае отсутствует экономическая целесообразность в её применении. Более подробно по этому обоснованию может служить информация в работе [10].

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Вклад автора. Автор одобрил рукопись (версию для публикации), а также согласился нести ответственность за все аспекты работы, гарантируя надлежащее рассмотрение и решение вопросов, связанных с точностью и добросовестностью любой её части.

Этическая экспертиза. Неприменимо.

Источники финансирования. Отсутствуют.

Раскрытие интересов. Автор заявляет об отсутствии отношений, деятельности и интересов за последние три года, связанных с третьими лицами (коммерческими и некоммерческими), интересы которых могут быть затронуты содержанием статьи.

Оригинальность. При создании настоящей работы автор не использовал ранее опубликованные сведения (текст, иллюстрации, данные).

Доступ к данным. Редакционная политика в отношении совместного использования данных к настоящей работе не применима, новые данные не собирали и не создавали.

Генеративный искусственный интеллект. При создании настоящей статьи технологии генеративного искусственного интеллекта не использовали.

Рассмотрение и рецензирование. Настоящая работа подана в журнал в инициативном порядке и рассмотрена по обычной процедуре. В рецензировании участвовали два внешних рецензента, член редакционной коллегии и научный редактор издания.

ADDITIONAL INFORMATION

Author contribution: The author approved the version of the manuscript to be published and agreed to be accountable for all aspects of the work, ensuring that issues related to the accuracy or integrity of any part

ISSN 0321-4443 «Тракторы и сельхозмашины». Том 92, № 4, 2025

ТЕОРИЯ, КОНСТРУИРОВАНИЕ, ИСПЫТАНИЯ

of the work are appropriately investigated and resolved.

Ethics approval: N/A.

Funding sources: No funding.

Disclosure of interests: The author has no relationships, activities, or interests for the last three years related to for-profit or not-for-profit third parties whose interests may be affected by the content of the article.

Statement of originality: No previously obtained or published material (text, images, or data) was used in this study or article.

Data availability statement: The editorial policy regarding data sharing does not apply to this work as no new data was collected or created.

Generative AI: No generative artificial intelligence technologies were used to prepare this article.

Provenance and peer review: This paper was submitted unsolicited and reviewed following the standard procedure. The peer review involved two external reviewers, a member of the editorial board, and the in-house scientific editor.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ | REFERENCES

1. Terekhin AN, Slesarenko IV, Gorlanov AV, et al. Prospects for the development of autonomous energy supply sources based on gas piston and gas turbine engines. *Dvigatelsestroenie*. 2007;(1):30–33. EDN: KNPKQP
2. Kostin DA, Kudasheva IO, Razuvaev AV, Kobzev RA. Features of using gas generators to generate fuel for autonomous power plants based on gas piston machines. *Energobezopasnost' i energosberezhenie*. 2024;(3):39–44. EDN: BYMFBT
3. Kuvshinov YuYa, Samarin OD. *Fundamentals of building microclimate*. Moscow: ASV; 2012. EDN: QNQBVBH
4. Certificate of state registration of computer programs № 2014610697 / 16.01 Kozhanova ER, Kostin DA, Razuvaev AV, Tkachenko IM. *Calculation of an additional heat source*.
5. Razuvaev AV. *Reciprocating internal combustion engines with high temperature cooling*. Saratov: Sarat. gos. tekhn. un-t; 2001.
6. Agafonov AN, Razuvaev AV. *Improving the characteristics of power plants based on CH 21/21 engines of small-scale power facilities*. Saratov: Sarat. gos. tekhn. un-t; 2006. EDN: QMJJNF
7. Razuvaev AV. Expanding the operation of cogeneration plants. *Alternative Fuel Transport*. 2024(3(99)):73–78. EDN: CGEFSJ
8. Razuvaev AV. The specifics of calculating a cogeneration plant for heating. In: *Current problems and ways of development of energy, engineering and technology. Collection of works from the International scientific and practical conference*. Balakovo; 2024:232–237. EDN: MPJQCR
9. Razuvaev AV. Analysis of energy consumption of facilities and characteristics of a cogeneration plant. *Promyshlennaya energetika*. 2025(1):11–15. doi: 10.71759/kp8f-6x65 EDN: FMPPGM
10. Razuvaev AV, Sarmaev AV. Updating the energy security of various infrastructure facilities. *Vestnik KRSU*. 2023;23(12):60–67. doi: 10.36979/1694-500X-2023-23-12-60-67 EDN: VZRLYZ

ОБ АВТОРЕ / AUTHOR'S INFO

Разуваев Александр Валентинович,
д-р техн. наук, доцент;
профессор кафедры «Атомная энергетика»
Балаковского инженерно-технологического
института;
адрес: Россия, 413853, Балаково, ул. Чапаева,
д. 140;
ORCID: 0000-0002-4593-0653;
eLibrary SPIN: 7336-7031;
e-mail: vipdomik@mail.ru

Alexander V. Razuvaev,
Dr. Sci. (Engineering), Assistant Professor,
Professor of the Nuclear Energy Department of
the Balakovo Institute of Engineering and
Technology;
address: 140 Chapaeva st, Balakovo, Russia,
413853;
ORCID: 0000-0002-4593-0653;
eLibrary SPIN: 7336-7031;
e-mail: vipdomik@mail.ru