

Оценка эффективности использования накопителей энергии

Добрынин Е.В.¹, Крылов А.Н.², Батищев А.М.²

¹ФГБОУ ВО «СамГУПС», ²ООО «СамараНИПИнефть», Самара, Россия
batischev_AM@samnpi.rosneft.ru

Аннотация

Применение накопителей энергии в энергетических системах при производстве, распределении и потреблении электроэнергии является актуальной задачей. Этому посвящено множество статей, проектов и исследований. Но до практической реализации доведено малое количество. Причина этого — высокая стоимость по сравнению с получаемыми от их применения эффектами. В статье рассмотрены критерии, на основании которых можно сделать заключение об эффективности применения накопителей энергии в различных энергосистемах. В качестве объекта исследований выбраны промышленные предприятия, жилой сектор.

Материалы и методы

Экспериментальные замеры, статистический анализ.

Ключевые слова

электроэнергия, накопитель, аккумулятор, эффективность, мощность, система электроснабжения, электрическая сеть, нагрузка

Для цитирования

Добрынин Е.В., Крылов А.Н., Батищев А.М. Оценка эффективности использования накопителей энергии // Экспозиция Нефть Газ. 2020. № 6. С. 110–113. DOI: 10.24411/2076-6785-2020-10110

Поступила в редакцию: 03.11.2020

ELECTRICAL ENGINEERING

UDC 621.355 | Original Paper

Assessment of efficiency of use of energy storage

Dobrynin E.V.¹, Krylov A.N.², Batishchev A.M.²

¹Samara State University of Railway Transport, ²“SamaraNIPIneft” LLC, Samara, Russia
batischev_AM@samnpi.rosneft.ru

Abstract

The use of energy storage devices in power systems in the production, distribution and consumption of electricity is an urgent task. There are many articles, projects, and studies devoted to this. But a small number of them have been brought to practical implementation. The reason for this is the high cost compared to the effects obtained from their use. The article considers the criteria on the basis of which it is possible to make a conclusion about the efficiency of using energy storage devices in various power systems. Industrial enterprises and the residential sector were chosen as the object of research.

Materials and methods

Experimental measurements, statistical analysis.

Keywords

electricity, storage, battery, efficiency, power, power supply system, power grid, load

For citation

Dobrynin E.V., Krylov A.N., Batishchev A.M. Assessment of efficiency of use of energy storage. Exposition Oil Gas, 2020, issue 6, P. 110–113. (In Russ). DOI: 10.24411/2076-6785-2020-10110

Received: 03.11.2020

Процесс использования электроэнергии является непостоянным во времени, поскольку зависит от желаний и потребностей абонентов. Мощность нагрузки меняется в зависимости от технологических процессов, расписания работы предприятий, времени суток и просто желаний людей воспользоваться электроприборами. Производство энергии осуществляется в режиме, который должен соответствовать потребностям в электроэнергии конечных потребителей. Для обеспечения бесперебойного электроснабжения мощность источников должна превышать мощность нагрузки одновременно работающих потребителей электроэнергии.

Это обеспечивается применением источников электроэнергии повышенной мощности, созданием резервных источников и объединением нескольких источников в единую энергетическую сеть.

Производство электрической энергии в России в основном приходится на теплоэлектростанции (ТЭС), в меньшей степени на гидро- и атомные электростанции (ГЭС и АЭС), небольшую долю составляют возобновляемые источники энергии: ветровые и солнечные электростанции (ВЭС и СЭС) (рис. 1) [1].

Для получения электроэнергии на электростанциях используется комплекс

генераторов определенной мощности, который включается в работу в зависимости от подключаемой у абонентов нагрузки. При этом, как правило, мощность вводимых в работу генераторов превышает мощность нагрузки, чтобы обеспечить надлежащее качество электроэнергии. Коэффициент использования мощности оборудования электростанции при существующих режимах нагрузки составляет около 50 % (таб. 1).

Отрицательной стороной такого режима работы генераторов является пониженный коэффициент полезного действия (КПД) и избыточный перевод энергии первоисточника

(топлива для ТЭС и АЭС) в тепло. В случае утилизации произведенной тепловой энергии для нужд систем отопления и горячего водоснабжения эффективность использования энергии топлива повышается, но часть энергии всё равно рассеивается в виде тепла в окружающую среду.

Оптимальным графиком производства электроэнергии для ТЭС, ГЭС и АЭС является равномерный режим. При таком графике имеется возможность включить в работу требуемое количество генераторных установок в режиме максимального для них КПД.

Для ветровых и солнечных электростанций задача совмещения режимов производства электроэнергии и ее потребления сложнее, поскольку кроме неравномерности и стохастичности мощности нагрузки работа генераторов зависит от непостоянных погодных условий.

Для решения задач совмещения неравномерности мощности нагрузок и генерирования электроэнергии используются накопители энергии. Для ВЭС и СЭС системы накопления энергии учитываются в проекте и строительстве электростанций с самого начала их жизненного цикла. В ГЭС также используется накопитель энергии, которым является водохранилище перед плотиной. Но этот накопитель скорее следует отнести к хранилищу первоисточника энергии, аналогично резервуару с топливом для ТЭС, поскольку потенциальная энергия уровня воды переходит в электрическую только после преобразования (турбины).

При передаче электроэнергии от электростанции до потребителей используется энергосеть, в которой происходит ее ступенчатое преобразование (повышение и понижение напряжения) и распределение по отходящим ветвям до конечных потребителей. Неравномерность нагрузки учитывается и при распределении энергии: при проектировании электрических сетей и станций закладывается избыточная мощность трансформаторов и сечение проводов, чтобы обеспечить пики нагрузки. Но при этом коэффициент использования этого оборудования составляет, как и для электростанций, в среднем около 50 %.

Идея использования накопителей энергии на различных уровнях распределительных сетей — от генератора до конечного потребителя — не нова и есть проекты, реализующие ее. Как сказано было выше, СЭС и ВЭС изначально оборудуются накопителями, а в крупных системах электроснабжения используются гидроаккумулирующие электростанции. Об использовании накопителей у конечных потребителей достаточно много звучит обсуждений, выпущено публикаций, выполнено проектов и проведено исследовательских работ [2, 3, 4]. Но до реализации доведено их очень малое число. Причина — высокая стоимость установок по сравнению с получаемым положительным эффектом.

В настоящее время использование энергетических систем, которые были спроектированы в прошлом веке для меньших нагрузок, повышает интерес к использованию накопителей энергии, которые позволили бы снизить пиковые значения мощности и использовать имеющиеся ресурсы электрооборудования. То есть если изначально эффективность применения накопителей рассчитывалась исходя из повышения КПД генераторных электроустановок и

снижения потерь при транзите электроэнергии, то в условиях повышающегося дефицита мощности в свете роста нагрузки применение накопителей следует сравнивать со строительством и эксплуатацией нового источника электроэнергии.

Также следует учесть тенденцию развития возобновляемых источников энергии, таких как ветровые и солнечные, объединение которых с традиционными электростанциями в единую энергетическую систему без накопителей энергии невозможно. Актуальным в этом случае является использование возобновляемых источников энергии на удаленных объектах нефтяного комплекса в качестве основного или резервного, параллельно традиционной системе электроснабжения, что невозможно реализовать без накопителей.

В свете этого возникает задача оценки эффективности применения накопителей энергии на объектах нефтяного комплекса в зависимости от таких параметров, как характер нагрузки, вид источников электроэнергии и режим их работы, параметры системы электроснабжения, требования к надежности, качеству и бесперебойности электроснабжения.

Далее рассматривается использование накопителей энергии у потребителей вне зависимости от типа источников — стабильного или нестабильного во времени. Потребителей условно можно разделить на две группы: группа 1 — только потребляющие электроэнергию;

группа 2 — потребляющие и рекупирующие электроэнергию.

В свою очередь группу потребителей, способных переходить в режим генерации, следует разделить на подгруппы:

группа 2.1 — с возвратом электроэнергии во внешнюю систему электроснабжения;

группа 2.2 — без возврата электроэнергии во внешнюю систему электроснабжения.

К первой подгруппе относятся бытовые и производственные предприятия. Их график нагрузки определяется мощностью используемого оборудования, работа которого зависит от производственных процессов и хозяйственно-бытовых нужд. Использование накопителей энергии для таких потребителей позволит решить следующие задачи:

1. снижение потерь электроэнергии в питающих линиях и трансформаторах за счет выравнивания питающего тока;
2. снижение пиковой нагрузки на систему внешнего электроснабжения в периоды максимальной мощности;
3. возможность экономить на покупке электроэнергии при переходе на многоставочные тарифы.

Таб. 1. Использование установленной мощности электростанций
Tab. 1. Using the installed capacity of power plants

№	Тип электростанции	Количество выработанной электроэнергии, млрд кВт·ч	Коэффициент использования установленной мощности электростанций, %
1	ТЭС	679,9	45,68
2	ГЭС	190,3	43,85
3	АЭС	208,8	79,82
4	ВЭС	0,32	19,91
5	СЭС	1,3	14,14
ИТОГО		1080,62	49,32

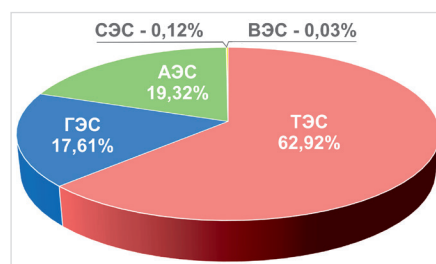


Рис. 1. Распределение долей производства электроэнергии в России за 2019 год
Fig. 1. Distribution of electricity production shares in Russia for 2019

Выравнивание тока нагрузки за счет использования накопителей энергии у потребителя позволяет снизить потери электроэнергии в питающих объект линиях электропередач и трансформаторах [2]. В момент снижения нагрузки накопитель заряжается, в момент максимальной мощности — отдает накопленную энергию. Эффект от использования накопителя проявляется, если потребитель имеет собственную распределительную сеть, понижающие подстанции и накопители устанавливаются в непосредственной близости от энергоемкого оборудования. В этом случае эффективность применения накопителя может оцениваться аналогично применению компенсаторов реактивной мощности. Ведь применение и того и другого ведет к снижению полной мощности, передаваемой к нагрузке. Но компенсатор снижает только реактивную составляющую, а накопитель способен снизить и реактивную, и активную составляющие передаваемой энергии [3].

Максимальным эффект будет тогда, когда уровень мощности станет постоянным во времени. При таком режиме потери, определяемые среднеквадратичным значением передаваемой мощности, могут снизиться в пределе до половины.

Оценки статистических показателей изменения графиков мощностей проводились для различных потребителей, включая потребителей нефтяной отрасли. Как видно по результатам, снижение потерь от применения накопителей энергии в большей степени будет наблюдаться у потребителей, имеющих более высокий показатель коэффициента вариации по графику нагрузки. То есть чем больше разброс в величине нагрузки в течение периода оценки, тем больше эффект снижения потерь электроэнергии даст накопитель. По полученным значениям видно, что максимальный эффект будет у двух предприятий — около 30 %. Если потери по внутренним сетям составляют порядка 5 %, то снижение их произойдет до уровня 3,5 % (таб. 2).

Исходя из разницы средней и максимальной мощности рассчитывается требуемая мощность накопителя, а из графика — его емкость (рис. 2). Сравнение приведенных затрат, с учетом эксплуатационных расходов, со стоимостью сэкономленной на потерях электроэнергии даст оценку целесообразности применения накопителя энергии на рассматриваемом объекте.

Расчет системы электроснабжения какого-либо объекта изначально предусматривает пиковую мощность нагрузки, поэтому критическим такой момент не является. Исключение может составлять одномоментное включение нагрузки нескольких потребителей, подключенных к одной питающей системе электроснабжения на мощность, близкую к максимальной. Но такие ситуации носят вероятностный и, как правило, кратковременный характер и не способны привести к выходу из строя энергетического оборудования.

Снижение пиковой нагрузки имеет экономический эффект, только если предприятие переходит на двухставочный тариф (далее речь идет о потребителях, не относящихся к населению). В таком случае в пиковые часы должна контролироваться максимальная мощность и не превышать заявленного значения. Чем меньше будет уровень заявленной мощности, тем ниже ее стоимость, но тем больше вероятность превысить границу.

Установка накопителя энергии, который заряжается в ночной период и отдает энергию при пиковых нагрузках, будет иметь экономическую выгоду при условии:

$$\sum (P_{\text{нагр}} - P_{\text{заявл}}) \cdot C_m \geq \left(\frac{K_{\text{нэ}}}{T_{\text{н}}} + \varepsilon \right),$$

Где:

- $P_{\text{нагр}}$ — фактическая мощность нагрузки, кВт;
- $P_{\text{заявл}}$ — заявленная мощность, кВт;
- C_m — цена за заявленную мощность;
- $K_{\text{нэ}}$ — стоимость накопителя энергии;
- $T_{\text{н}}$ — плановый период окупаемости накопителя, год;
- ε — годовые эксплуатационные затраты на содержание накопителя электроэнергии, включая потери электроэнергии в установке.

Таб. 2. Статистическая оценка суточного изменения мощности различных потребителей
Tab. 2. Statistical assessment of the daily change in the power of various consumers

Показатель	Насосная станция	Предприятие 1	Предприятие 2	Многоквартирный дом
Максимальная мощность, кВт	314	210,8	136,5	14,1
Минимальная мощность, кВт	110	26,7	28,3	4,1
Средняя мощность, кВт	157	96,3	65,5	6,3
Среднеквадратичная мощность, кВт	161	110,9	74,9	6,5
Стандартное отклонение	33	55,0	36,5	1,5
Коэффициент вариации	0,211	0,571	0,557	0,237
Осцилляция	1,296	1,911	1,653	1,576
Изменение потерь, %	-4,4	-32,5	-31,0	-5,6

В левой части неравенства рассчитывается годовой эффект от применения накопителя энергии. Показатель является интегральным, поскольку зависит от ценовой категории потребителя и режима работы предприятия в течение года. Мощность накопителя и его емкость рассчитываются исходя из разницы между заявленной (оплачиваемой) и фактически потребляемой мощностью и временем его работы.

По фактическому расходу электроэнергии за прошедший период можно оценить эффект применения накопителя. Для этого находится зависимость снижения затрат на покупку электроэнергии от разницы между двумя заявленными мощностями: без использования накопителя и с использованием накопителя. Так же находится зависимость мощности и емкости накопителя от той же разницы. И если графики экономии и приведенных затрат на накопитель пересекутся в пределах разницы мощностей, равной средней мощности нагрузки за расчетный период, или экономия будет превышать приведенные затраты, то можно найти оптимальный, экономически выгодный вариант применения накопителя энергии. В противном случае его использование для потребителя с рассмотренной позиции становится невыгодным.

По оценке экономической эффективности применения накопителей энергии на двух предприятиях мы видим что на первом предприятии экономическая эффективность отсутствует, а на втором предприятии экономическая эффективность достигается только при применении накопителей в определенном интервале снижения потребляемой мощности (рис. 3). При расчете экономической эффективности применения накопителей следует учитывать такие факторы как, режимы работы, потребляемую мощность и условия покупки электроэнергии.

В случае покупки электроэнергии по дифференцированному тарифу эффект от использования накопителя электроэнергии рассчитывается аналогичным образом. Снижение затрат на покупку электроэнергии будет достигаться за счет того, что будет снижена составляющая пиковых зон и повышена составляющая ночной тарифной зоны.

Перевод нагрузки между тарифными зонами не дает явной экономии электроэнергии для потребителя, поскольку задача такой рокировки — это снижение затрат на покупку электроэнергии. Однако любой тариф на электроэнергию включает в себя составляющую ее производства и передачи, то есть перевод нагрузки из пиковых зон снизит потери в системе внешнего электроснабжения и затраты на ее производство. Задача дифференцирования цен и состоит в том, чтобы простимулировать перевод процесса электропотребления из пиковых зон в другие, с меньшей нагрузкой [5].

Эффект от применения накопителей энергии в системах, где возможен возврат электроэнергии, то есть процесс рекуперации, как это бывает в системах тягового электроснабжения, зависит от способа утилизации сгенерированной энергии. Если имеется возможность возврата сгенерированной электроэнергии в систему внешнего электроснабжения и этот возврат идет в зачет такому субъекту, то эффект от накопителя будет аналогичным, как и описанный выше. Но для возврата электроэнергии во внешнюю сеть необходимо обеспечить надлежащее качество генерируемого напряжения и разрешение на этот процесс, что встречается только в теории. На практике возврат рекуперированной электроэнергии во внешнюю сеть реализован в единичных случаях.

При отсутствии возможности передачи рекуперированной электроэнергии во внешнюю сеть необходимо наличие нагрузки

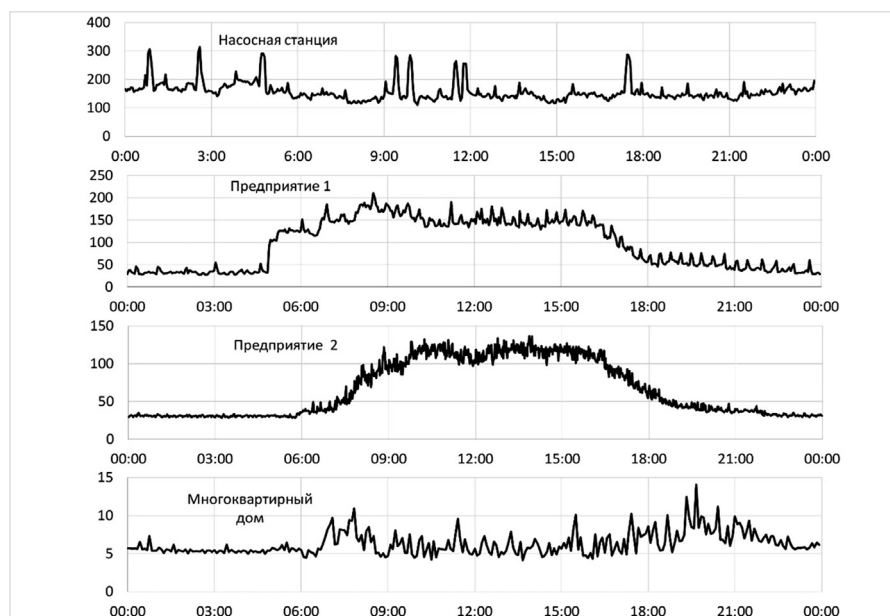


Рис. 2. Графики суточного изменения мощности различных потребителей, кВт
Fig. 2. Graphs of daily changes in the power of various consumers, kW

внутри сети, что на практике получается не всегда. Выходит, что применение накопителя позволит при любом раскладе принять избыток энергии от рекупирующих установок и отдать энергию в моменты пиковой нагрузки.

Оценка эффективности для системы тягового электроснабжения проводится по критериям: снижение потерь в сети и экономия на покупке электроэнергии, но к ним добавляется еще увеличение степени использования энергии рекуперации [3]. Последний критерий может составлять вклад в эффективность использования накопителя больше, чем остальные.

Итоги

Принцип оценки экономической целесообразности применения накопителя энергии строится на интегральной оценке получаемых эффектов: повышение степени использования энергии рекуперации, снижение потерь в распределительных сетях и снижение затрат на покупку электроэнергии. В другой стороне неравенства остаются приведенные капитальные вложения и затраты на эксплуатацию устройства.

Выводы

При положительном экономическом и техническом эффекте переход на массовое применение накопителей сдерживается сложностью устройств сопряжения между накопителем и сетью, где он должен работать, динамикой изменения нагрузки и высокой стоимостью накопителей. Но постепенное внедрение пилотных проектов позволяет пройти переходный процесс от единичных

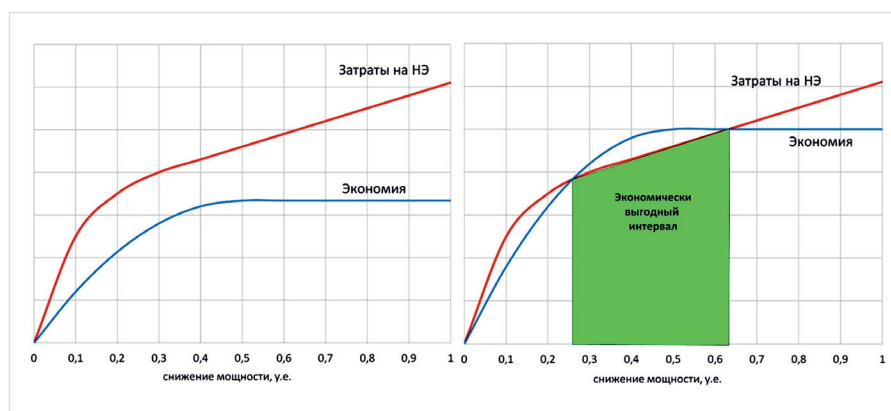


Рис. 3. Пример оценки экономической целесообразности использования накопителя энергии

Fig. 3. An example of evaluating the economic feasibility of using an energy storage device

реализаций до массового применения накопителей энергии, получая от них ожидаемый положительный эффект.

Литература

1. Основные характеристики российской электроэнергетики. Министерство энергетики Российской Федерации. URL: <https://minenergo.gov.ru/node/532>
2. Шевлюгин М.В. Снижение расхода энергии и рабочей мощности основного силового оборудования тяговых подстанций электрических железных дорог с помощью накопителей энергии. М.: МИИТ, 2007. 151 с.
3. Баранов Л.А., Бродский Ю.А., Гречишников В.А., Подаруев А.И., Пупынин В.Н.,

- Шевлюгин М.В. Оценка эффективности использования стационарных емкостных накопителей энергии в метрополитене на основе экспериментальных замеров показателей работы системы тягового электроснабжения // Электротехника. 2010. № 1. С. 62–65.
4. Шевлюгин М.В., Стадников А.Н., Юдин А.С. О применении накопителей энергии в системе электроснабжения мегаполиса на примере Москвы // Электропитание. 2020. № 1. С. 7–31.
 5. Митрофанов А.Н., Гаранин М.А., Добрынин Е.В. Управление технологиями электропотребления и энергосбережения. Самара: СамГУПС, 2009. 150 с.

ENGLISH

Results

The principle of evaluating the economic feasibility of using an energy storage device is based on an integral assessment of the resulting effects: increasing the degree of use of recovery energy, reducing losses in distribution networks and reducing the cost of purchasing electricity. On the other side of the inequality, the given capital investment and the cost of operating the device remain.

Conclusions

With a positive economic and technical effect, the transition to mass use of drives is constrained by the complexity of the interface devices between the drive and the network where it should work, the dynamics of load changes, and the high cost of drives. But the gradual introduction of pilot projects allows you to go through the transition process from single implementations to mass use of energy storage devices, getting the expected positive effect from them.

References

1. Main characteristics of the Russian electric power industry. Ministry of energy of the Russian Federation. URL: <https://minenergo.gov.ru/node/532> (In Russ).
2. Shevlyugin M.V. Reduction of energy consumption and operating power of the main power equipment of traction substations of electric Railways using energy storage devices. Moscow: Russian University of Transport (MIIT), 2007. 151 p. (In Russ).
3. Baranov L.A., Brodsky Yu.A., Grechishnikov V.A., Podaruyev A.I., Pupynin V.N., Shevlyugin M.V. Evaluation of the efficiency of using stationary capacitive energy storage devices in the metro based on experimental measurements of performance indicators of the traction power supply system. Electrical Engineering, 2010, issue 1, P. 62–65. (In Russ).
4. Shevlyugin M.V., Stadnikov A.N., Yudin A.S. On the use of energy storage devices in the megapolis power supply system on the example of Moscow City. Power Supply, 2020, issue 1, P. 7–31. (In Russ).
5. Mitrofanov A.N., Mitrofanov A.N., Garanin M.A., Dobrynin E.V. Management of power consumption and energy saving technologies. Samara: SamGUPS, 2009, 150 p. (In Russ).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ | INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Добрынин Евгений Викторович, к.т.н., заведующий кафедрой «Электроснабжение ж.д. транспорта» ФГБОУ ВО СамГУПС, Самара, Россия

Крылов Алексей Николаевич, к.т.н., главный специалист ООО «СамараНИПИнефть», Самара, Россия

Батищев Арсений Михайлович, к.т.н., ведущий инженер ООО «СамараНИПИнефть» Самара, Россия

Для контактов: Batischev_AM@samnipi.rosneft.ru

Dobrynin Evgeniy Viktorovich, ph. d., head of the department of Electricity for Railway Transport, Samara State University of Railway Transport, Samara, Russia

Krylov Alexey Nikolaevich, ph. d., candidate of technical sciences, chief specialist, “SamaraNIPIneft” LLC, Samara, Russia

Batishchev Arseniy Mihajlovich, ph. d., candidate of technical sciences, leading engineer, “SamaraNIPIneft” LLC, Samara, Russia
Corresponding authors: Batischev_AM@samnipi.rosneft.ru