

**Казанский Федеральный Университет**

**Кафедра технологии нефти, газа и углеродных материалов**

**Kazan Federal University.**

**Department of oil & gas technology and carbon materials**

**Исследование процесса получения высокоструктурированного кокса**

**моделированием в среде ASPEN HYSYS**

**Study of the process of obtaining highly structured coke by simulation in the**

**ASPEN HYSYS environment**

**Аббас Халил Билал, Abbas Khalil Bilal <sup>1</sup>**

**Кемалов Руслан Алимович, Kemalov Ruslan Alimovich <sup>2</sup>**

магистрант кафедры технологии нефти, газа и углеродных материалов<sup>1</sup>

кандидат технических наук, доцент кафедры технологии нефти, газа и углеродных

материалов, Член Экспертного совета Российского газового общества (РГО),

и.о. руководителя группы «Водородная и альтернативная РГО, профессор РАЕ<sup>2</sup>

E-mail: abbas-bilal@mail.ru, kemalov@mail.ru

**Аннотация:** В данной статье исследуется возможность выработки игольчатого кокса на имеющихся мощностях одного из нефтеперерабатывающих заводов России. Получение данного продукта позволит сохранить актуальность установки замедленного коксования на фоне строительства новых мощностей, а также снизит зависимость металлургической отрасли от импорта игольчатого кокса. При этом высокая стоимость продукта позволит сохранить на прежнем уровне рентабельность переработки тяжелых нефтяных остатков (ТНО) нефтеперерабатывающего предприятия (НПП). Для расчета возможности безубыточной переработки ТНО в высокоструктурированный продукт используется программа линейного моделирования Aspen HYSYS, которая позволила качественно проанализировать результаты, определить целесообразность и эффективность предлагаемого мероприятия, а также оценить влияние на товарную корзину НПП.

**Abstract:** The article examines the possibility of producing needle coke at the present capacities of one of the Russian oil refineries. Obtaining this product will allow for maintaining the relevance of the delayed coking plant against the background of the formation of new capacities, and also reduce the dependence of the metallurgical industry on the import of needle coke. At the same time, the high cost of the product will allow the profitability of black oil processing of the oil refining enterprise to remain at the same level. To calculate the possibility of break-even processing of black oil into a highly structured product, the Aspen HYSYS linear modeling program is used, which allowed the authors to qualitatively analyze the results, determine the feasibility and effectiveness of the proposed action, as well as assess the impact on the market basket of the oil refining enterprise.

**Ключевые слова:** замедленное коксование, игольчатый кокс, тяжёлый газойль, металлургия, моделирование, нефтепродукты

**Keywords:** delayed coking, needle coke, heavy gas oil, metallurgy, modeling, petroleum products

## **1 Введение (Introduction)**

В настоящее время в условиях сложившейся внешнеэкономической ситуации большое значение для ведущих отраслей отечественной промышленности: оборонной, атомной, металлургической и т.д.; представляет организация промышленного производства игольчатого кокса в России. Большая часть потребления игольчатого кокса приходится на металлургическую промышленность, а именно на технологию электросталеплавления, чья доля составляет 30 % всех производимых отечественных сталей [1]. Так, за 2019 г. предприятия, занимающиеся выпуском электродов, нарастили объемы закупки на 8,4 % за счет импорта игольчатого кокса для производства качественных графитированных электродов [2]. Зависимость сталеплавильной отрасли от импорта является важной проблемой, так как в условиях сегодняшних экономических санкций приводит к высокому риску остановки производства в ведущих отраслях промышленности.

## Introduction

The LNG production complex is an expensive and complex technical and technological facility. The efficiency of its functioning depends on many factors: the availability of sufficient natural gas resources, technological processes for the preparation and liquefaction of gas, consumables for the implementation of all technological processes of the LNG complex, the location of the LNG production complex, the purpose and the required quality of LNG. In practice, the decision to build an LNG complex in a particular region is made on the basis of an analysis of the demand for natural gas, the availability of 157 resource base and qualified personnel, access to technology and equipment, investment opportunities. When developing the project of the LNG production complex, it is necessary to take into account various characteristics of the region: socio-economic, industrial, climatic. The assessment of the potential demand for natural gas in the absence of gas pipeline supplies makes it possible to calculate the performance of an LNG installation. Raw material quality.

По технологии получения электростали в электродуговых печах используются графитированные электроды типа ЭГСП (Э – электрод; Г – графитированный; С – специальный; П– пропитанный, по международной маркировке UHP – Ultra High Power), которые создают электрическую дугу и впоследствии расплавляют железосодержащее сырье, далее металл доводится до необходимых физико-химических свойств в агрегатах ковш-печь (АКП) [3]. Для производства данных электродов и нужен игольчатый кокс.

Одним из возможных вариантов получения ценного сырья для металлургической промышленности является получение игольчатого кокса на нефтеперерабатывающих заводах (НПЗ) [4, С. 374–375]. На сегодняшний день в России в эксплуатации находятся 32 НПЗ, на которых работает более 8 установок замедленного коксования, перерабатывающих тяжелые нефтяные остатки (ТНО) первичных и вторичных процессов с целью углубления нефтепереработки [5].

Для производства игольчатого кокса на установках замедленного коксования требуется пересорт сырья с ТНО ввиду содержания в них большого количества

серы и асфальто-смолистых веществ на тяжелые каталитические газойли установок каталитического крекинга (ТКГ). Данное сырье имеет достаточную коксуемость, малое содержание серы и значительное содержание ароматических соединений. Именно такое малосернистое и богатое ароматическими углеводородами сырье позволит получить кокс анизотропной структуры с ценными свойствами: низкими значениями коэффициента температурного расширения и удельного электрического сопротивления [6, С. 104].

### **Методы и принципы исследования (Research methods and principles)**

Для определения эффективности выпуска нового продукта на НПЗ используется распространенная и широко используемая программа оптимизационного планирования Aspen HYSYS, которая позволяет качественно проанализировать результаты и определить целесообразность предлагаемого мероприятия еще на стадии проекта.

Aspen HYSYS – программа линейного моделирования, при помощи которой на НПЗ решаются производственные и бизнес-процессы: факторный анализ бизнес-планирования и текущего планирования, ретроанализ от текущего плана к факту, расчет производственной программы, оценка мероприятий повышения операционной эффективности и т.д. [7].

Модель HYSYS состоит из множества таблиц-данных, на основе которых формулируется и решается модель линейного программирования, описывающая завод через подмодели-технологические установки, при этом учитывается множество входных факторов: стоимость сырья, утилит, продукции, логистические и технологические ограничения.

Процесс оценки производства нового продукта состоит из следующих этапов:

- расчет производственной программы в Aspen HYSYS, версия V9, позволяет определить оптимальность принятого решения;
- расчет изменения затрат от базового варианта на закупку сырья, утилиты и т.д.;
- расчет выручки от предложенного мероприятия в зависимости от изменения товарной корзины.

## Основные результаты (Main results)

Описание результатов моделирования процесса производства игольчатого кокса в программе линейного моделирования Aspen HYSYS.

В соответствии со стратегией развития НПЗ с 2026 года планируется реализация крупного инвестиционного проекта по строительству установки замедленного коксования УЗК–2000, что позволит достичь глубину переработки нефти на уровне более 95 %.

Совместно с вводом в эксплуатацию установки замедленного коксования мощностью 2 млн.т./год планируется строительство трубопровода по передаче тяжелых нефтяных остатков (ТНО) с одной производственной площадки на другую.

Для сравнения изменения эффективности уже работающей УЗК мощностью 700 тыс.т./год произвели расчеты на долгосрочной глобальной модели 2021–2041 гг. В качестве оценочных моделей были выбраны 2024 г. – годовая модель без реализации проекта УЗК–2000; а также 2028 г. – годовая модель с учетом реализации проекта. Целью данного расчета является анализ изменения экономических потерь от простоя УЗК мощностью 700 тыс.т./год на протяжении всего периода моделирования.

Таблица 1 – Расчет простоя УЗК

| Показатель                    | 24 г.     | 28 г.      |
|-------------------------------|-----------|------------|
| Объем переработки, тыс.т./год | 609,77    | 609,77     |
| Экономический эффект, тыс.    | 391 262,8 | 997 890,04 |
| Простой, тыс. руб./сут.       | 5 659,05  | 9 120,31   |

Из таблицы 1 видно, что с учетом одинакового объема нефтепереработки по году, а также равными внешними макропараметрами (цены, спрос на товарные нефтепродукты) разница от простоя УЗК на модели «с проектом» и «без проекта» составляет порядка +2,4 млрд. руб./год, т.е. эффективность установки замедленного коксования значительно снижается исходя из понесенных потерь от простоя технологической установки в денежном эквиваленте на 26 %.

Представленные расчеты лишь подтверждают, что при реализации крупного инвестиционного проекта по строительству УНПЗ - 2000 появляется возможность использовать установку замедленного коксования мощностью 700 тыс.т./год для выработки ценного продукта – игольчатого кокса.

В процессе моделирования нового режима на установке замедленного коксования вводится ряд исходных данных для определения наилучшего решения. Так, в модель одного из российских НПЗ в таблице CASE прописали сценарий (вариант) мероприятий по получению нового продукта, путем изменения значений во входных таблицах HYSYS и путем изменения соответствующей установки модели.

В качестве сырья выбраны тяжелые газойли (ТКГ 1, ТКГ 2), имеющих на НПЗ установок каталитического крекинга и остаток термического крекинга вакуумного газойля. Проведены лабораторные исследования сырья на возможность получения из них игольчатого кокса (рис. 1).

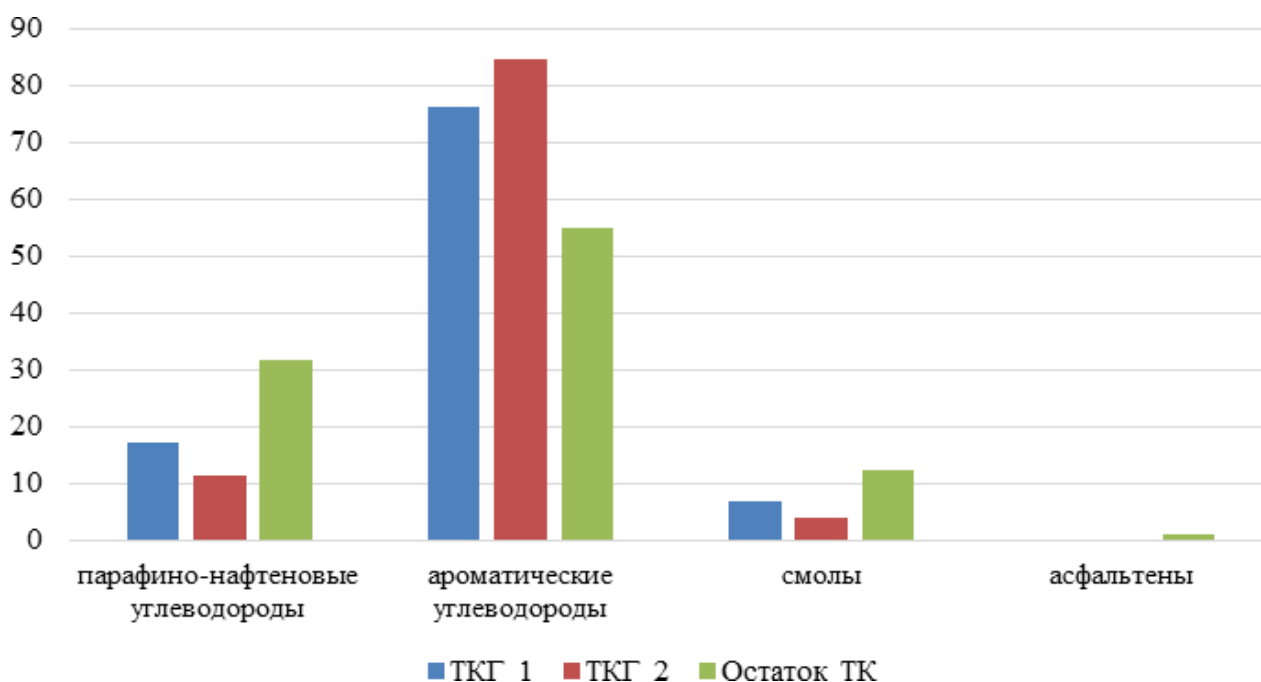


Рис. 1 – Групповой состав исследуемого сырья

Из рис.1 видно, что предлагаемое сырье обладает достаточным содержанием ароматических соединений и смол, присутствие которых приводит к образованию однородной мезофазы, в процессе чего формируется струйчатая (волокнистая) анизотропная структура до образования конечной твердой фазы кокса.

|    |             |                                 |          |             |            |   |  |              |  |
|----|-------------|---------------------------------|----------|-------------|------------|---|--|--------------|--|
| 7  | *           |                                 |          |             |            |   |  |              |  |
| 8  | CASE700     | 2027 г. Анизотропный кокс (УЗК) |          |             |            |   |  |              |  |
| 9  | MODIFIES652 |                                 |          |             |            |   |  |              |  |
| 10 | GENERATE    |                                 |          |             |            |   |  |              |  |
| 11 | *           |                                 |          |             |            |   |  |              |  |
| 12 | *           |                                 |          |             |            |   |  |              |  |
| 13 | TABLE       | DEMAND                          |          |             |            |   |  |              |  |
| 14 |             | TEXT                            | MIN1     | MAX1        | PRICE      |   |  |              |  |
| 15 | KKAM        | Анизотропный кокс (0,6% серы)   | 0,0000   | 1000,0000   | 95144,0000 | * |  | Указать цену |  |
| 16 | KKBM        | Анизотропный кокс (1,0% серы)   | 0,0000   | 0,0000      | 44174,0000 | * |  |              |  |
| 17 | AP4M        |                                 |          | 2000,0000   |            |   |  |              |  |
| 18 | AP5M        |                                 |          | 2000,0000   |            |   |  |              |  |
| 19 | AN4M        |                                 |          | 2000,0000   |            |   |  |              |  |
| 20 | AN5M        |                                 |          | 2000,0000   |            |   |  |              |  |
| 21 | AO4M        |                                 |          | 2000,0000   |            |   |  |              |  |
| 22 | AO5M        |                                 |          | 2000,0000   |            |   |  |              |  |
| 23 | *           |                                 |          |             |            |   |  |              |  |
| 24 | TABLE       | ROWS                            |          |             |            |   |  |              |  |
| 25 |             | TEXT                            | TKKAB2R. | TKKBB2R.    | FIX        |   |  |              |  |
| 26 | ETRPBR.     | Novoufimskaya station products  | -1,0000  | -1,0000     |            |   |  |              |  |
| 27 | WBALKKB.2   |                                 |          |             | 1,0000     |   |  |              |  |
| 28 | *           |                                 |          |             |            |   |  |              |  |
| 29 | TABLE       | TRANSFER                        |          |             |            |   |  |              |  |
| 30 |             | TEXT                            | MIN1     | MAX1        |            |   |  |              |  |
| 31 | KKAB2R      | Анизотропный кокс (0,6% серы)   | 0,0000   | 365000,0000 |            |   |  |              |  |
| 32 | KKBB2R      | Анизотропный кокс (1,0% серы)   | 0,0000   | 365000,0000 |            |   |  |              |  |
| 33 | FTCCBP      | ТКГ 1А/1М                       | 0,0000   | 2000,0000   |            |   |  |              |  |
| 34 | FTAABP      | ТКГ Г-43-107                    | 0,0000   | 2000,0000   |            |   |  |              |  |
| 35 | VGRCBP      | Сырье ГО на ТК-2                | 0,0000   | 2000,0000   |            |   |  |              |  |
| 36 | *           |                                 |          |             |            |   |  |              |  |
| 37 | *           |                                 |          |             |            |   |  |              |  |
| 38 | MODEL       | B                               |          |             |            |   |  |              |  |
| 39 | *           |                                 |          |             |            |   |  |              |  |
| 40 | TABLE       | SCALE                           |          |             |            |   |  |              |  |
| 41 |             | TEXT                            | PENALTY  |             |            |   |  |              |  |
| 42 | SUL         |                                 | EMPTY    |             |            |   |  |              |  |
| 43 | *           |                                 |          |             |            |   |  |              |  |
| 44 | TABLE       | BUY                             |          |             |            |   |  |              |  |
| 45 |             | TEXT                            | MIN1     | MAX1        | COST       |   |  |              |  |
| 46 | FTC         | ТКГ 1А/1М                       | 0,0000   | 1000,0000   | 1,0000     |   |  |              |  |
| 47 | FTA         | Г-43-107                        | 0,0000   | 1000,0000   | 1,0000     |   |  |              |  |
| 48 | VGR         | Сырье ГО на ТК-2                | 0,0000   | 1000,0000   | 1,0000     |   |  |              |  |
| 49 | *           |                                 |          |             |            |   |  |              |  |
| 50 | TABLE       | BLENDS                          |          |             |            |   |  |              |  |
| 51 |             | TEXT                            | SPEC     |             |            |   |  |              |  |
| 52 | KKA         | Анизотропный кокс (0,6% серы)   | 1,0000   |             |            |   |  |              |  |
| 53 | KKB         | Анизотропный кокс (1,0% серы)   | 1,0000   |             |            |   |  |              |  |
| 54 | *           |                                 |          |             |            |   |  |              |  |
| 55 | *           |                                 |          |             |            |   |  |              |  |

Рис. 2 – Ввод исходных данных

За счет того, что в сырье практически отсутствуют асфальтены коксуемая масса больше времени пребывает в полужидком состоянии, отдача продуктов реакций распада и уплотнение реакционной массы проходит легче [8, С. 24]. Таким образом, игольчатый кокс обладает низким содержанием летучих



веществ и меньшей пористостью. Содержание серы и коксуемость, соответственно, составляет для ТКГ 1 =0,48 % масс., 0,9%, ТКГ 2 =0,55% масс., 1,28% , и остатка термического крекинга = 0, 9% масс.. 8,9% масс.

В программу мы внесли следующие исходные данные:

1. Ограничения по выпуску игольчатого кокса, цены на новый продукт;
2. «Расшили» продажу мазута;
3. Прописали уравнением отгрузку кокса на ЖД;
4. Прописали свойства получаемого кокса на основании имеющихся данных опытно-промышленного пробега установки на ТКГ;
5. В подмодели сырья УЗК прописали возможность подачи тяжелого газойля крекинга;
6. Определили и внесли ограничения по мощности УЗК с учетом удлиненного цикла;
7. Внесли материальные балансы на режиме переработки тяжелых каталитических газойлей, а также качественные характеристики получаемых продуктов.
8. Все изменения прописаны дополнительным вектором в подмодели УЗК.
9. На рисунке 2 приведён фрагмент ввода исходных данных при помощи таблицы CASE модели НПЗ.

### **Обсуждение (Discussion)**

Основные мероприятия, предполагаемые проектом по выработке анизотропнококса:

1. Отмена подачи ТНО на УЗК;
2. Строительство нового трубопровода для совместной транспортировки гидроочищенного вакуумного газойля (ГО ВГО) и остатка гидрокрекинга (ГК) для вовлечения в качестве сырья на установку термического крекинга;
3. Вовлечение ТКГ каталитических крекингов на УЗК в качестве сырья (предполагается строительство новых трансферных трубопроводов);
4. Вовлечение остатка термического крекинга (ТК) (в режиме работы на ГО ВГО и остатке ГК) в сырье УЗК.



В процессе расчета HYSYS обрабатывает порядка 250 таблиц, представляющих модель завода, подбирает оптимальное сырье для производства игольчатого кокса, распределяет потоки между установками, находя наилучшее решение в предлагаемых условиях [9, С. 85]. Целевой функцией расчета является экономический эффект в виде денежного эквивалента [10, С. 350]. По результатам расчета Aspen HYSYS выдает отчет по «сырьевым» движениям на НПЗ, товарной корзине, полученные данные выгружаются в формат Excel и далее анализируется службами производственного планирования и бизнес-планирования (см. таблицу 2)

Таблица 2 – Результаты расчетов

| Товарная корзина                          | Выработка анизотропного кокса с содержанием серы до 0,6% масс. (проект-базовый вариант), тыс.т. |
|-------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Ожидаемый экономический эффект, млн. руб. | +8 449,526                                                                                      |
| АИ-92                                     | +1,7                                                                                            |
| Алкилат                                   | -2,2                                                                                            |
| Бензин газовый стабильный                 | +6,1                                                                                            |
| Дизельное топливо                         | -41,0                                                                                           |
| Вакуумный газойль                         | -512,0                                                                                          |
| Мазут                                     | +525,5                                                                                          |
| Добавка коксующая                         | -192,4                                                                                          |
| Ароматика                                 | +1,7                                                                                            |
| Сжиженные углеводородные газы             | -4,8                                                                                            |
| Добавка спекающая                         | -                                                                                               |
| Анизотропный кокс с S до 0,6 % масс.      | +161,8                                                                                          |

Расходная часть проекта включает в себя:

1. Снижение мощностей по переработке ТНО приводит к значительному увеличению выработки мазута;
2. Увеличение выработки мазута приводит к снижению выработки светлых

нефтепродуктов как из-за снижения переработки ТНО, так и из-за возросшей потребности в разбавителях для мазута с целью достижения качественных характеристик;

3. Снижение загрузок каталитических крекингов и гидрокрекинга из-за вовлечения их сырья на производство анизотропного кокса и сокращения выработки газойлей на установках термического крекинга и замедленного коксования.

Доходную часть проекта составляет выработка высокомаржинального продукта – анизотропного кокса.

### **Заключение (Conclusion)**

По результатам расчета наблюдается максимальная загрузка установки термического крекинга в режиме переработки ГО ВГ и рециркулята ГК и УЗК в режиме анизотропного кокса.

При этом на ТК происходит вовлечение только ГО ВГО, остаток ГК не вовлекается во все периоды. Это связано с тем, что ГО ВГО имеет более высокую плотность, среднюю температуру кипения и содержание серы, чем рециркулят ГК, поэтому дает более высокий выход остатка ТК с более высокой коксуемостью, что объясняется большей выработкой анизотропного кокса на УЗК. При этом рециркулят ГК дает более высокие выхода светлых нефтепродуктов на установке каталитического крекинга в связи с чем и направляется на данную установку.

Таким образом, выработка анизотропного кокса на действующей установке замедленного коксования принесёт НПЗ дополнительную маржу в условиях сохранения выработки светлой товарной продукции.

## Список литературы (References)

1. Доля выплавки электростали в мире растет из года в год [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.metalinfo.ru/ru/news/107231> (дата обращения: 27.03.2021).
2. Российский рынок нефтяного кокса в 2019 году [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.refinitiv.ru/blog/market-insights/rossijskij-rynok-neftjanogo-koksa-v-2019/> (дата обращения: 27.03.2021).
3. ГОСТ Р 56973-2016 Графитированные электроды для электродуговых печей. Эксплуатация [Электронный ресурс]. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200136424> (дата обращения: 27.03.2021).
4. Прошкин, С.Е. Нефтяной кокс для алюминиевой промышленности. Технология и свойства / В.П. Твердохлебов, С.А. Храменко, Ф.А. Бурюкин и др. // «Сибирский федеральный университет». – 2010. – № 3 – С. 369–386.
5. Список НПЗ России [Электронный ресурс]. – URL: <https://pronpz.ru/neftepererabatyvayushchie-zavody/rossiya.html> (дата обращения: 27.03.2021).
6. Хайрудинов И.Р. Перспектива расширения сырьевой базы для получения игольчатого кокса / И.Р. Хайрудинов, А. А. Тихонов, М. М. Ахметов // Башкирский химический журнал. – 2011. – Т.18. – №3. – С. 103–111.
7. Официальный сайт Aspen Technology [Электронный ресурс]. – URL: <https://clck.ru/UjQt9> (дата обращения: 25.03.2021).
8. Валявин, Г.Г. Перспективы развития процесса замедленного коксования в РФ и нетрадиционное направление использования нефтяного кокса / Г. Г. Валявин и др. // Мир нефтепродуктов. Вестник нефтяных компаний. – 2011. – № 6. – С. 22–24.
9. Рындин Д.А. Исследование процесса приобретения и подбора катализаторов для установки «Гидрокрекинг» с помощью программы оптимизационного планирования Aspen Pims / Д.А. Рындин, О.Ю. Белоусова, Р.Ш. Япаев // Башкирский химический журнал. – 2016. – Т.23. – №1. – С. 83–87.
10. Шпак О.С. Математическое моделирование технологического процесса в среде Unisim Design и Aspen PIMS / О.С. Шпак, А.Р. Фаизов, С.К. Чуракова и др. // Материалы Третьей Всероссийской конференции «Интенсификация тепло-массообменных процессов». – Казань: КНИТУ, 2012. – С 248-352.