

РАСЧЕТНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОВОГО СОСТОЯНИЯ ИСПЫТАТЕЛЬНЫХ СТЕНДОВ БМ-П И БМ-ЛР

© 2019 г. А. А. Рякин^{1,2,*}, Е. С. Горбачева^{1,2}, О. В. Койнов^{1,2}, М. В. Никульшин^{1,2}

¹ Снежинский физико-технический институт –
филиал Национального исследовательского ядерного университета "МИФИ",
Снежинск, 456776, Россия

² Российский федеральный ядерный центр –
Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики имени акад. Е.И. Забабахина,
Снежинск, 456770, Россия

*e-mail: artemryakin@mail.ru

Поступила в редакцию 29.01.2019 г.

После доработки 29.03.2019 г.

Принята к публикации 09.04.2019 г.

В настоящее время в РФЯЦ ВНИИТФ проводятся исследования реактора водорода на основе высокопористых ячеистых материалов. Реактор служит для беспламенного сжигания водорода. В реакторе при протекании через пористый катализатор происходят различные физико-химические процессы, основными из которых являются экзотермическая химическая реакция окисления водорода на каталитических поверхностях реактора и конвективное течение газовой смеси через каталитический блок. Эти процессы определяют технические характеристики реактора, наиболее важной является производительность, измеряемая при заданном составе входящего газа. Для проведения испытаний по определению диапазона концентраций водорода, в котором осуществляется режим беспламенной работы реактора при атмосферном давлении, повышенных температурах и влажностях, характерных для сценария тяжелых аварий на АЭС, используются камеры БМ-ЛР и БМ-П. Камера БМ-ЛР представляет собой внутреннюю камеру (пятитонный железнодорожный контейнер), и внешний термос (слой минеральной ваты и стекломатная плита). Внутренняя камера обеспечивает герметичность, одна из стенок камеры для возможности видеофиксации результатов эксперимента закрыта листом поликарбоната, который вылетит при повышении давления во время воспламенения водорода и сохранит целостность металлической части камеры. Необходимая температура для проведения эксперимента поддерживается при помощи тепловых пушек. Камера БМ-П представляет собой стальной цилиндр высотой 4 м и диаметром 2 м. На стенках камеры имеются окна для возможности скоростной видеосъемки процессов конденсации и распространения пламени. Конструкция камеры позволяет сохранять герметичность при высоких давлениях, и способна выдерживать значительные взрывные нагрузки, возникающие вследствие воспламенения пароводяной смеси. В данной статье представлена информация о результатах расчетных исследований температурных полей камер БМ-ЛР и БМ-П при различных режимах работы реактора. Определены максимальные значения температуры, и поля скоростей газовой смеси, движущейся в камерах при работе реактора.

Ключевые слова: водородная безопасность, реактор, температурное поле, поле скоростей

DOI: 10.1134/S2304487X19030118

В настоящее время в РФЯЦ ВНИИТФ проводятся исследования реактора водорода на основе высокопористых ячеистых материалов. Реактор (рис. 1) служит для беспламенного сжигания водорода. В реакторе при протекании через пористый катализатор происходят различные физико-химические процессы, основными из которых являются экзотермическая химическая реакция окисления водорода на каталитических поверхностях реактора и конвективное течение газовой смеси через каталитический блок. Эти процессы определяют технические характеристики

реактора, наиболее важной является производительность, измеряемая при заданном составе входящего газа.

Для проведения испытаний по определению диапазона концентраций водорода, в котором осуществляется режим беспламенной работы реактора при атмосферном давлении, повышенных температурах и влажностях, характерных для сценария тяжелых аварий на АЭС, используются камеры БМ-ЛР и БМ-П.

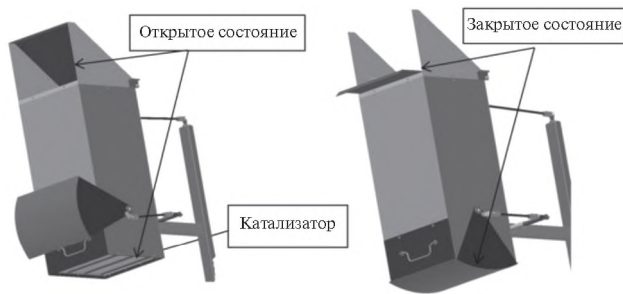


Рис. 1. Конструкция рекомбинатора.

Камера БМ-ЛР представляет собой внутреннюю камеру (пятитонный железнодорожный контейнер), и внешний термос (слой минеральной ваты и стекломagneзиевая плита). Внутренняя камера обеспечивает герметичность, одна из стенок камеры для возможности видео фиксации результатов эксперимента закрыта листом поликарбоната, который вылетит при повышении давления во время воспламенения водорода и сохранит целостность металлической части камеры. Необходимая температура для проведения эксперимента поддерживается при помощи тепловых пушек.

Камера БМ-П представляет собой стальной цилиндр высотой 5 м и диаметром 2 м. На стенках камеры имеются окна для возможности скоростной видеосъемки процессов конденсации и распространения пламени. Конструкция камеры позволяет сохранять герметичность при высоких давлениях, и способна выдерживать значительные взрывные нагрузки, возникающие вследствие воспламенения пароводяной смеси.

Предварительные расчеты необходимы для прогнозирования процессов, вероятных при проведении экспериментов, оценки температурных

режимов и обеспечивающих необходимые условия для тестирования рекомбинатора.

Цели расчетов камеры БМ-П: расчетное обоснование достаточности системы охлаждения для поддержания постоянной температуры газовой смеси внутри камеры.

Цели расчетов камеры БМ-ЛР: определение времени, за которое температура поликарбонатного листа превысит температуру плавления поликарбоната 150°C.

Задачи расчетов камеры БМ-П и БМ-ЛР:

- Моделирование работы блока катализаторов;
- Определение максимальных температур в камерах при работе рекомбинатора;
- Расчет полей скоростей газовой смеси, движущейся в установке при работе рекомбинатора;

При концентрации водорода 3% энерговыделение катализатора составляет 9.6 кВт. Для концентрации водорода до 8% повышает энерговыделение до 24 кВт.

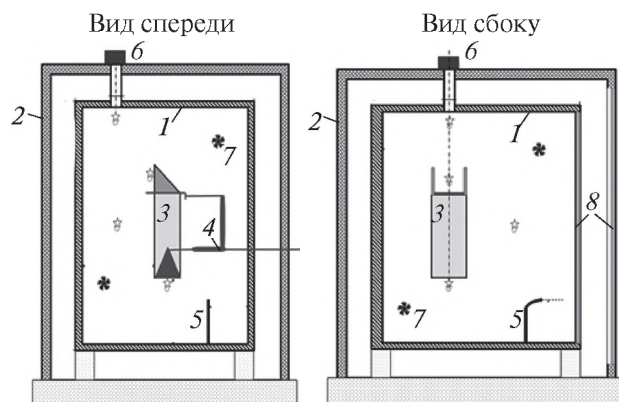
Конечно-элементная модель камеры БМ-П представлена на рис. 4.

Расчеты камеры БМ-П проводились для четырех вариантов начальных условий с включенной и выключенной системой охлаждения. Температура теплоносителя в системе охлаждения принималась равной 20°C.

Газовая смесь моделировалась при помощи типа элемента соответствующего газу/жидкости, катализатор моделировался типом элемента пористое тело.

В расчетах использовалась модель турбулентности $k-\varepsilon$ и учитывалась гравитация.

Максимальная температура в камере БМ-П при давлении $P = 500$ кПа и $T = 110^\circ\text{C}$ на момент времени 1710 с, с включенной системой охлаждения составляет 455.6°C.



- 1 – контейнер;
 - 2 – термос;
 - 3 – рекомбинатор;
 - 4 – устройство открытия/закрытия входов рекомбинатора;
 - 5 – труба для подачи газов;
 - 6 – клапан сброса давления;
 - 7 – вентилятор;
 - 8 – поликарбонатный лист.
- Зелеными окружностями обозначено расположение датчиков влажности, звездочками – точки отбора проб.

Рис. 2. Камера БМ-ЛР.

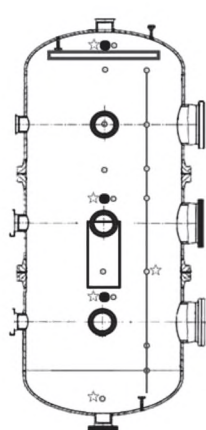


Рис. 3. Камера БМ-II.

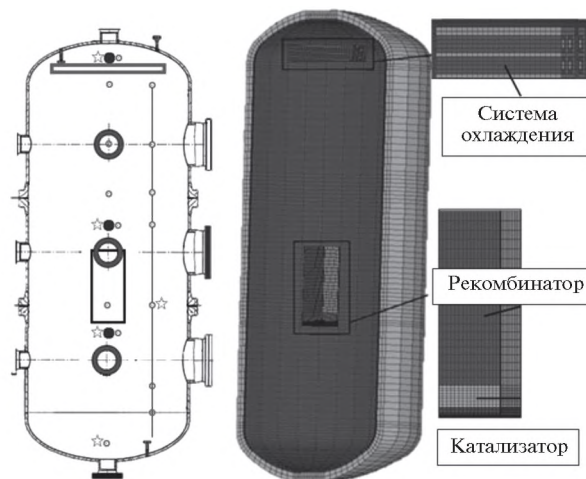


Рис. 4. Конечно-элементная модель камеры БМ-II.

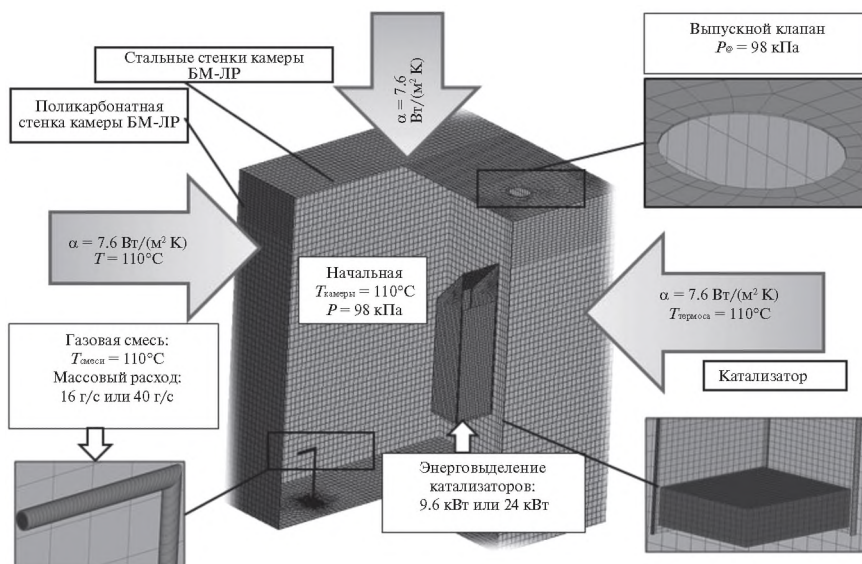


Рис. 5. Конечно-элементная модель и граничные условия БМ-ЛР.

Сравнение результатов расчетов с включенной и выключенной системой охлаждения показывает:

- Выключенная система охлаждения в камере благодаря своей значительной теплоемкости влияет на температурное поле внутри камеры, понижая максимальную температуру газовой смеси, проходящей через нее;
- Включенная система охлаждения понижает максимальную температуру газовой смеси в камере до 20°C , а среднюю температуру газовой смеси до 40°C ;
- Для увеличения эффективности работы системы охлаждения следует понизить температуру воздуха в теплообменнике или увеличить его размеры.

Конечно-элементная модель камеры БМ-ЛР и граничные условия представлены на рис. 5.

Установка предварительно прогревается тепловыми пушками до 110°C , затем заполняется смесью водород–пар–воздух. Начальная температура 110°C соответствует возможной температуре при развитии сценария тяжелой аварии “малая течь”. Для предотвращения окисления водорода на поверхности катализатора до начала эксперимента рекомбинатор находится в закрытом состоянии. Эксперимент начинается в момент открытия входов рекомбинатора. После начала работы рекомбинатора в установку непрерывно подается смесь водорода, пара и воздуха с концентрациями газов, соответствующими стартовому составу.

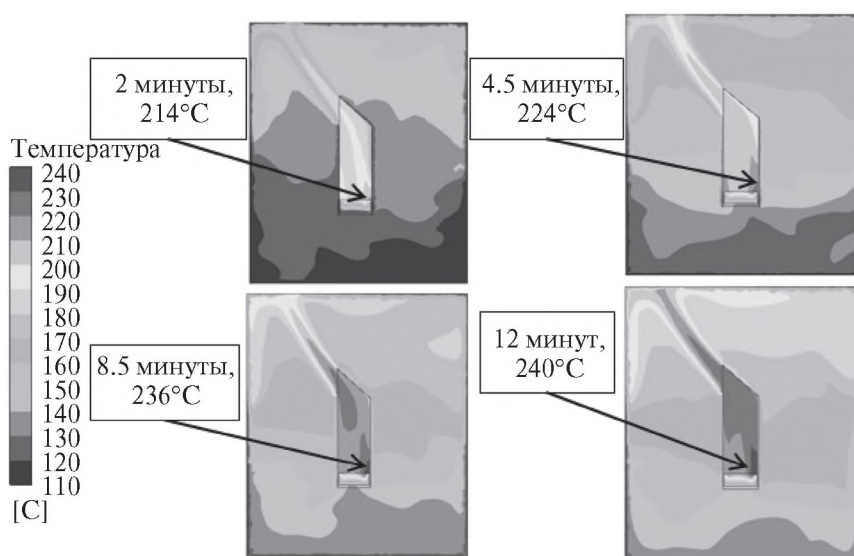


Рис. 6. Температурные поля камеры БМ-ЛР и рекомбинатора на различные моменты времени при режиме энерговыделения 9.6 кВт ($^{\circ}\text{C}$).

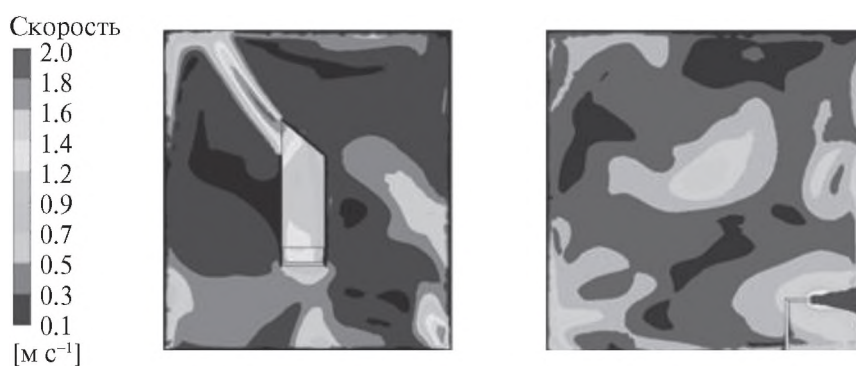


Рис. 7. Поля скоростей воздуха в камере БМ-ЛР и рекомбинаторе на момент времени 8.5 мин при режиме энерговыделения 9.6 кВт (м/с).

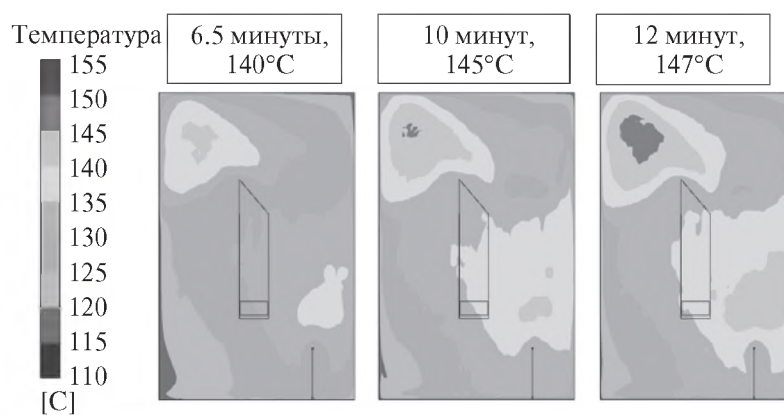


Рис. 8. Температурные поля поликарбонатной стенки камеры БМ-ЛР на различные моменты времени при режиме энерговыделения 9.6 кВт ($^{\circ}\text{C}$).

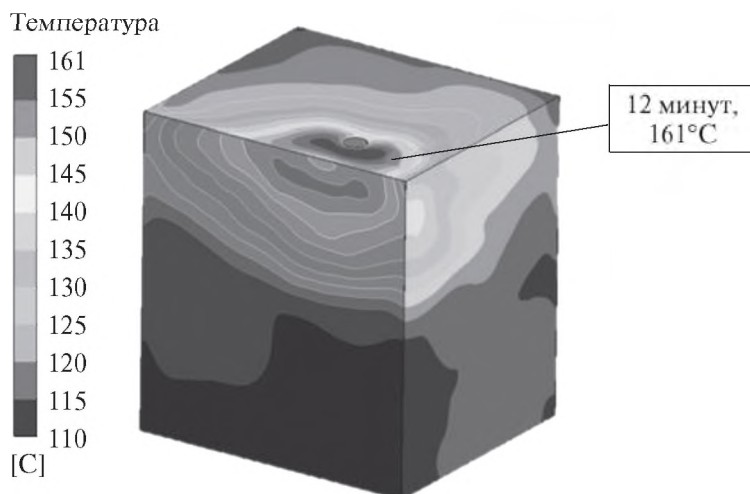


Рис. 9. Температурное поле металлических стенок камеры БМ-ЛР при режиме энерговыделения 9.6 кВт ($^{\circ}\text{C}$).

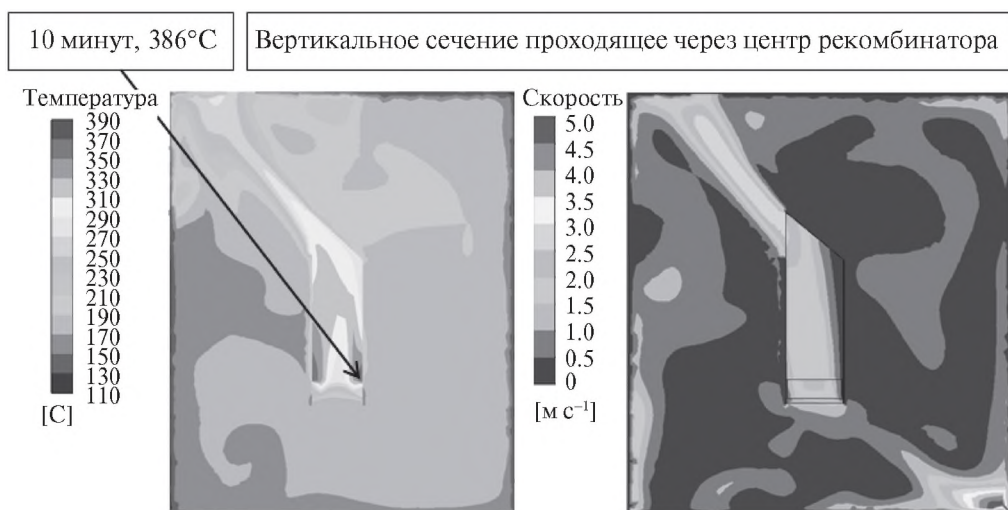


Рис. 10. Температурное поле и камеры БМ-ЛР и рекомбинатора и поле скоростей воздуха при режиме энерговыделения 24 кВт ($^{\circ}\text{C}$).

БМ-ЛР непрерывно обдувается тепловыми пушками (температура воздуха 110°C).

Эксперимент продолжается до момента:

1) превышения температуры смеси в установке значения 140°C (плавление поликарбоната начинается при 150°C);

2) воспламенения смеси в установке.

После завершения эксперимента подачу газов прекращают, установка продувается воздухом или азотом.

Результаты расчетов камеры БМ-ЛР представлены на рис. 6–9.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлены результаты расчетных исследований температурных полей камер БМ-ЛР и БМ-П при различных режимах работы рекомбинатора. Определены максимальные значения температуры, и поля скоростей газовой смеси, движущейся в камерах при работе рекомбинатора.

При режиме энерговыделения в катализаторе 9.6 кВт максимальная температура катализатора составляет 245°C на момент времени 12 мин, максимальная температура воздуха – 240°C . Металлические стенки камеры нагреваются до 161°C , стенка из поликарбоната не достигает температуры плавления.

При режиме энерговыделения в катализаторе 24 кВт максимальная температура катализатора

составляет 386°C, значение температуры воздуха 383°C. Температура плавления 150°C на поликарбонатной стенке достигается через 3 мин.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рякин А.А., Горбачева Е.С., Койнов О.В., Никулшин М.В., Путилин О.С. Расчетные исследования теплового состояния испытательных стендов БМ-П и БМ-ЛР. 2017. С. 1, 19. Тезисы доклада, презентация на VI Всероссийской научно-практической конференции “Научная сессия НИЯУ МИФИ”, декабрь 2017, Снежинск.
2. Лавренюк И.В., Симоненко В.А., Безgodов Е.В. Экспериментальное исследование стратификации и горения ВПГС. 2016. С. 1, 8. Тезисы доклада, презентация доклада на Международную конференцию “XIII Забавихинские научные чтения”, март 2017, Снежинск.

Vestnik Nacional'nogo Issledovatel'skogo Yadernogo Universiteta “MIFI”, 2019, vol. 8, no. 3, pp. 268–273

Computational Analysis of the Thermal States of BM-P and BM-LR Experimental Facilities

A. A. Ryakin^{a,b,#}, E. S. Gorbacheva^{a,b}, O. V. Koinov^{a,b}, and M. V. Nikulshin^{a,b}

^a Snezhinsk Physical–Technical Institute, National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Snezhinsk, Chelyabinskaya oblast, 456776 Russia

^b Russian Federal Nuclear Center VNIITF, Snezhinsk, Chelyabinskaya oblast, 456776 Russia

[#]e-mail: artemyryakin@mail.ru

Received January 29, 2019; revised March 29, 2019; accepted April 20, 2019

Abstract—A hydrogen recombiner based on high-porosity cellular materials is currently studied at the Russian Federal Nuclear Center VNIITF. The hydrogen recombiner is used for flameless hydrogen combustion. Hydrogen flowing through a porous catalyst in the recombiner induces various physical and chemical processes essentially including the exothermal chemical reaction of hydrogen oxidation on the catalyzing surfaces of the recombiner and a convective flow of a gas mixture through the catalyst unit. These processes determine the technical characteristics of the recombiner including the most important efficiency measured at a given input gas composition. The BM-LR and BM-P chambers are used to conduct experiments to estimate the hydrogen concentration range within which the recombiner operates in a flameless mode at atmospheric pressure, high temperatures, and humidity, which are characteristic of severe nuclear power plant accidents [1, 2]. The BM-LR chamber includes an internal chamber (5-t railway container) and a thermally insulated external shell consisting of a mineral wool layer and a glass–magnesium plate. The internal chamber is air-tight, one of the walls being covered with a polycarbonate sheet to provide video recording of experimental results. The sheet is pushed away when pressure increases during hydrogen ignition to preserve the integrity of the metal part of the chamber. Heat guns maintain the temperatures required for the experiments. The BM-P chamber is a 4-m-high steel cylinder 2 m in diameter. The walls of the chamber are equipped with windows for high-speed video recording of condensation and flame propagation processes. The chamber is designed to keep air-tightness at high pressures and to withstand high explosive loads produced by an ignited vapor–water mixture. The temperature fields in the BMLR and BM-P chambers for different recombiner operation modes have been computationally analyzed. The maximum temperatures and velocity fields are determined for the gas mixture flowing within the chambers when the recombiner is in operation.

Keywords: hydrogen safety, recombiner, current stabilization, velocity field, temperature field

DOI: 10.1134/S2304487X19030118

REFERENCES

1. Ryakin A.A., Gorbacheva E.S., Koinov O.V., Nikulshin M.V., Computational Analysis of the Thermal States of “BM-P” and “BM-LR” Experimental Facilities, *Tesisi i presentacia doklada VI Vserossiskoi nauchno-prakticheskoi konferencii “Nauchnaia sessia NIAY MIFI”* (Report theses, presentation at VI All-Russia scientifically-practical conference “Scientific session NRNU MEPhI”), Snezhinsk, 2017, 17 p. (in Russian).
2. Lavrenyuk I.V., Simonenko V.A., Bezgodov E.V., Hydrogen–Air–Steam Mixtures Stratification and Deflagration Experimental Research, *Tesisi i presentacia doklada na mezhdunarodnoi konferencii “XIII Zababakhin scientific talks”* (Report theses, presentation at XIII Zababakhin scientific talks), Snezhinsk, 2017, pp. 254–255 (in Russian).