

УДК 614.485; 614.487
EDN: UOKSIL

PACS: 87.50; 92.60.Sz

Защитная решётка от УФ-излучения для проточных УФ-реакторов с низким аэродинамическим сопротивлением

© Д. Е. Науменко^{1,2,*}, Н. А. Колесник¹, Л. М. Василяк³¹ НПО «ЛИТ», Московская обл., г. Долгопрудный, 141701 Россия² Московский физико-технический институт, Московская обл., г. Долгопрудный, 141701 Россия

*E-mail: ddannaum@yandex.ru

³ Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, 125412 Россия

Статья поступила в редакцию 20.11.2025; после доработки 12.12.2025; принята к публикации 20.02.2026
Шифр научной специальности: 1.3.21

Анализ светозащитных решёток (П-образных, сотовых и жалюзийных) для проточных УФ-реакторов выявил противоречие между достижением высокого уровня экранирования УФ-излучения и низкого аэродинамического сопротивления. Для решения этой проблемы предложена жалюзийная решётка с уголковыми ламелями, дополненными прямолинейными входными и выходными участками. Численное моделирование и экспериментальные исследования показали, что уровень ослабления УФ-излучения у новой конструкции сопоставим с лучшим аналогом, которым является П-образная решётка, при снижении аэродинамического сопротивления в 9 раз. Достигнуто выравнивание потока в УФ-реакторе, снижение уровня шума ниже 40 дБ и уменьшение габаритов реактора без потери производительности.

Ключевые слова: УФ-излучение, УФ-реактор, УФ-обеззараживание, рециркулятор.

DOI: 10.51368/1996-0948-2026-1-94-100

Введение

Проточные газовые УФ-реакторы находят широкое применение в различных областях, включая обеззараживание воздуха в рециркуляционных системах, удаление газообразных примесей и запахов, а также проведение фотохимических реакций. Рециркуляторы с обеззараживанием воздуха УФ-излучением широко применяются в медицинских учреждениях, на объектах пищевой промышленности, в общественных и жилых помещениях, а также в других местах массового скопления людей. Среди методов обеззараживания воздуха УФ-облучение занимает лидирующие позиции [1] благодаря своей эффективности против широкого спектра микроорганизмов и отсутствию образования вредных побочных продуктов. Практическая эксплуатация выяв-

ляет ряд технических трудностей, связанных с обеспечением надежности и эффективности УФ-рециркуляторов. Одной из них является необходимость экранирования УФ-излучения, исходящего из камеры обеззараживания, для защиты людей от его воздействия. Для этого на входе и выходе реактора с УФ-облучением применяются светозащитные решетки, к материалу и конструкции которых предъявляются противоречивые требования. С одной стороны, решётка должна обеспечивать безопасность, блокируя выход УФ-излучения за пределы корпуса установки. С другой стороны, её конструкция не должна ухудшать аэродинамические и акустические (шумовые) показатели работы системы, при этом материал решеток должен быть устойчивым к воздействию УФ-излучения. Неудачно спроектированная решётка создает значительное аэроди-

намическое сопротивление, может являться причиной низкой бактерицидной эффективности и причиной повышенного уровня шума работы всей системы. Защитные решетки, используемые в настоящее время в конструкциях рециркуляторов, имеют большое аэродинамическое сопротивление и создают дополнительный шум или недостаточно экранируют УФ-излучение.

Задачей данного исследования являлась разработка конструкции светозащитной решетки УФ-реактора с высокой степенью экранирования УФ-излучения, с низкими потерями напора воздушного потока, сохранением равномерного потока в камере обеззараживания и низким уровнем шума.

Геометрия защитной решетки

В рециркуляторах применяются несколько типов светозащитных решеток: решетки на основе вложенных П-образных профилей [2] (рис. 1а); жалюзийные решетки с ламелями волнообразной формы (рис. 1б); сотовые фильтры из тонколистового металла (рис. 1в).

Решетки П-образного типа демонстрируют максимальную эффективность экранирования УФ-излучения в сравнении с жалюзийными и сотовыми. Однако, траектории потоков воздуха в таких решетках включают два последовательных разворота на 180° , что в сочетании с локальным увеличением скорости

в каналах приводит к значительным потерям напора.

Сотовые металлические фильтры обладают более низким аэродинамическим сопротивлением, чем П-образные решетки. Потери напора в сотовом фильтре связаны с взаимодействием и трением друг о друга разнонаправленных струй на выходе из решетки, а также с диссипацией энергии турбулентных вихрей в результате их контакта со стенками реактора и соседними струями. Геометрия сот в большинстве случаев исключает прямолинейное прохождение УФ-излучения, однако для них существует критический угол падения лучей, при котором количество внутренних отражений оказывается недостаточным для эффективного ослабления УФ-излучения.

Жалюзийные решетки обладают низким аэродинамическим сопротивлением, однако не всегда обеспечивают необходимый уровень экранирования УФ-излучения. Для повышения уровня поглощения УФ-излучения на ламели решеток наносят поглощающие покрытия (краски), однако под длительным воздействием УФ-излучения происходит их деструкция с эмиссией образующихся продуктов в воздушный поток [3]. Используемая в настоящее время форма ламелей задает направление потока, отличное от нормали к плоскости решетки, что приводит к отрыву потока от одной из стенок камеры УФ-реактора, вызывает образование турбулентных зон и неравномерное распределение скоростей в рабочем объеме реактора.

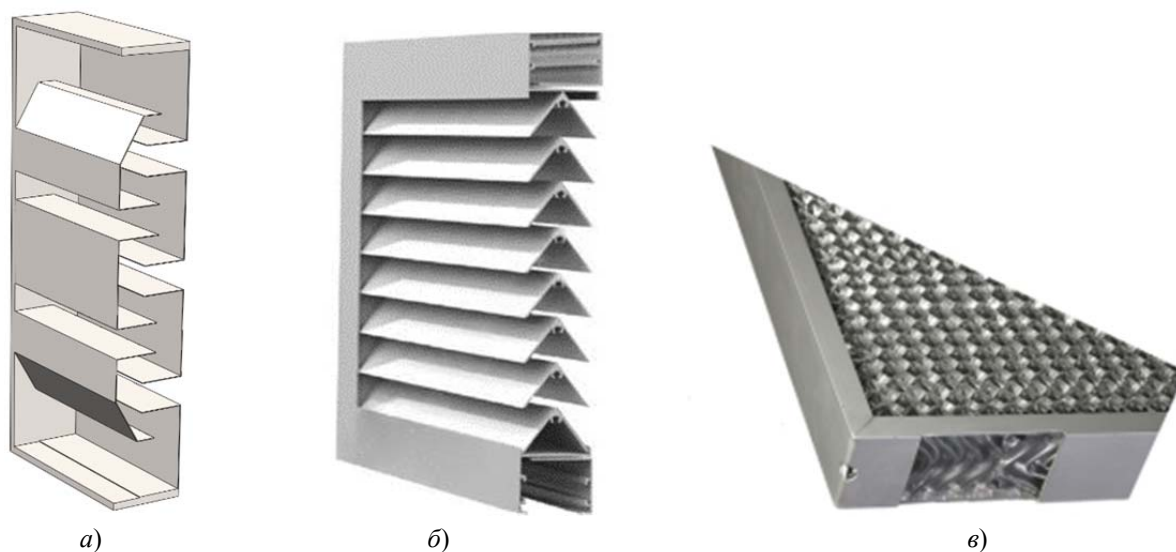


Рис. 1. Типы решёток. а) – П-образная, б) – жалюзийная, в) – сотовая

Неравномерность поля скоростей в рабочей камере реактора приводит к значительному разбросу времени пребывания в ней различных частей воздушного потока. Часть микроорганизмов проходят зону облучения за время, отличающиеся от расчетного, и получают дозу облучения ниже требуемого порога, что не обеспечивает их инактивацию. В результате снижается общая эффективность обеззараживания всего рециркулятора. Для компенсации снижения эффективности обеззараживания требуется либо увеличение мощности УФ-ламп, либо снижение скорости потока для повышения времени экспозиции, что снижает производительность установки. Конструкция решёток и реактора должна обеспечивать не только блокировку УФ-излучения, но и выравнивания потока воздуха за решёткой.

В рамках проведенного анализа существующих конструкций для дальнейшей разработки была выбрана схема решёток жалюзийного типа. Для достижения поставленных целей был разработан новый профиль ламели, представляющий собой угловую V-образную конструкцию с добавленными прямолинейными входным и выходным участками, направленными вдоль воздушного канала системы. Функциональное назначение данных участков заключается в следующем:

1. Входной участок предназначен для сегментации и стабилизации входящего потока перед его продвижением в лабиринтную часть профиля, что способствует снижению генерации турбулентности внутри решётки.

2. Выходной участок обеспечивает ориентацию воздушного потока вдоль оси камеры обеззараживания после прохождения лабиринта, минимизируя отклонение струй на стенки камеры.

3. Дополнительные прямолинейные участки повышают светозащитные характеристики за счет увеличения количества переотражений в межламельном пространстве решёток и создания дополнительных экранированных зон для траекторий УФ-излучения.

Численное моделирование

На первом этапе было проведено численное моделирование гидродинамических и оптических характеристик двух типов свето-

защитных решёток: традиционной конструкции на основе П-образных профилей и разработанной решётки, состоящей из угловых ламелей с дополнительными прямолинейными участками.

Гидродинамическое моделирование было выполнено методом конечных объёмов (CFD-моделирование по методу FVM с моделью турбулентности RANS [4]). Граничные условия для CFD-модели были заданы следующим образом: размеры вентиляционного канала 250 мм × 300 мм; на выходе задана равномерная скорость потока 1 м/с; на входе — статическое давление, равное атмосферному; стенки канала считались гладкими и непроницаемыми, а для поверхности решёток учитывали их шероховатость 1 мкм; линейный размер расчётной ячейки составлял 1 мм. Обе решётки моделировались в одних и тех же габаритных размерах. Геометрические параметры светозащитной решётки с П-образным профилем показаны в левой части на рис. 2а, жалюзийной решётки — на рис. 2б.

Программа численного моделирования предусматривала:

1. Визуализацию картин течения и векторных полей скорости;

2. Расчёт распределения скоростей в поперечном сечении на расстоянии 100 мм за решёткой;

3. Определение величины перепада полного давления на решётке;

4. Расчёт коэффициентов ослабления УФ-излучения решётками.

Результаты CFD-моделирования траекторий потоков в решетке и реакторе представлены на рис. 2. На рис. 2а показано распределение потоков с решёткой с П-образным профилем ламелей, на рис. 2б — с решёткой с ламелями разработанной конструкции в плоскости симметрии задачи. Для решётки с П-образными ламелями характерен больший разброс скоростей, возникновение вихрей и развитие турбулентности на выходе из решетки, что привело к локальному повышению скорости потока в камере обеззараживания, как и предполагалось на основе уравнения сохранения потока. Живое сечение на выходе для решётки с П-образными профилями составляет 20 % от сечения канала, что и является причиной локального повышения скорости потока на выходе из решётки в 5 раз по отно-

шению к скорости до решётки. Живое сечение на выходе из решётки с уголковыми ламелями составляет 90 % от сечения канала, поэтому скорость потока воздуха на выходе из каналов решётки увеличена всего на 10 % в сравнении со скоростью в канале. За решеткой нет вихрей, профиль скоростей течения достаточно

однороден. Среднее квадратичное отклонение скорости на расстоянии 100 мм от выхода из решёток составило 1,03 для решётки с П-образными ламелями и 0,27 с уголковыми ламелями. Перепад давления для решётки с П-образными ламелями составил 81,1 Па, а для решётки с уголковыми всего 12 Па.

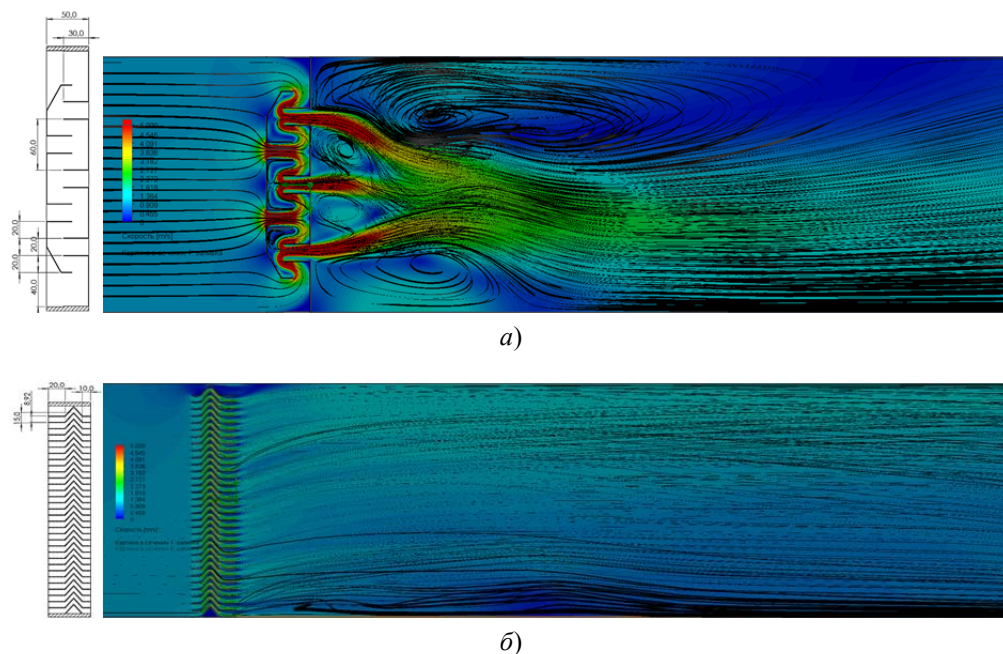


Рис. 2. Траектории потоков в решетке и реакторе: а) – П-образная решётка; б) – жалюзийная. Течение воздуха слева направо. Слева показана геометрия решеток

Расчеты светозащитных свойств решеток были выполнены методом трассировки лучей. Для проведения трассировки лучей использовались модели, учитывающие коэффициент отражения УФ-излучения с длиной волны 254 нм и комбинированный диффузно-зеркальный характер отражения от поверхностей. Результаты моделирования распространения УФ-излучения демонстрируют, что решётка из уголковых ламелей обеспечивает среднее по выходной плоскости экранирование сопоставимое с таковым в случае использования решётки с П-образными ламелями. При этом пиковые значения облучённости за обеими решётками находятся также на сопоставимом уровне. Расчётное среднее ослабление УФ-излучения (усреднение по площади сечения вентиляционного канала), определяемое как $\lg(E_0/E)$, где E_0 и E – облучённости без решётки и с решёткой, соответственно, для П-образной решётки составило 3,50, для решётки с уголковыми ламелями – 3,44, что достаточно для обеспечения безопасности.

Сравнение с экспериментом

На втором этапе исследования проведена экспериментальная верификация результатов численного моделирования. Перепады давления были измерены в вентиляционном канале с сечением, идентичным расчётной модели, с установленными металлическими светозащитными решётками. Для создания воздушного потока использовался центробежный вентилятор, расположенный на выходе из канала. Регулирование скорости потока в диапазоне 0,3–1,8 м/с осуществлялось ШИМ-контроллером независимо от типа устанавливаемой решётки, измерение скорости проводилось анемометром Testo 417. Измерение перепада давления на решётке выполнялось цифровым дифференциальным манометром. Измеренные величины перепада давления в зависимости от скорости воздуха в канале представлены на рис. 3.

Как следует из рис. 3, до скорости потока воздуха $v = 0,6$ м/с перепады давления на

обеих решётках отличаются незначительно. Начиная со скорости 0,8 м/с, П-образная решётка имела кратно большее сопротивление, чем уголковая решётка. При скорости потока 1 м/с перепад давлений на уголковой решётке равен 5 Па, а на П-образной решётке интерполированное значение составляет 48 Па. Таким образом, применяя для реактора с потоком газа защитную решётку с уголковыми ламелями, можно на порядок уменьшить перепад давлений при скоростях потока более 1 м/с.

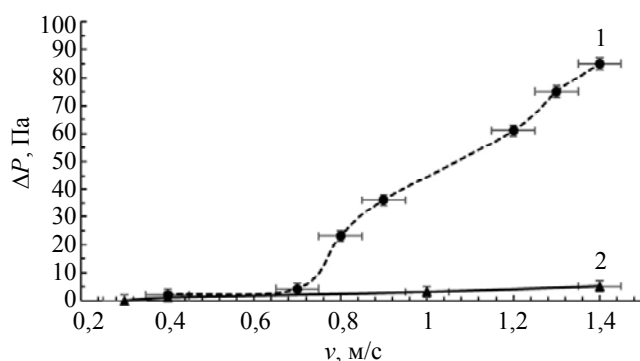


Рис. 3. Зависимость перепада давления ΔP , Па, до и после решётки от скорости воздуха. 1 – решётка с П-образными профилями, 2 – уголковая решётка

Срыв потока на лопастях вентилятора является одним из основных источников аэродинамического шума в вентиляционных системах, так как появляющиеся в этом процессе турбулентные вихри вызывают колебания давления, и как следствие – звуковые волны [5]. Уменьшенное сопротивление решётки позволило уменьшить и общий перепад давления в рециркуляторе, в результате чего уменьшился шум от устройства, т. к. вентилятор создавал меньший перепад давления в камере, что привело к уменьшению количества срывов потока на его лопастях. Эффект снижения уровня шума был измерен согласно методике, рекомендованной ГОСТ Р ИСО 3744-2013 [6], для двух тестовых реакторов, имеющих одинаковые размеры и вентиляторы, но различные светозащитные решётки. Система с двумя П-образными решётками имела уровень шума 42 дБ, а система с предложенными уголковыми решётками – 36 дБ. Следует отметить, что уровень шума от устройств в различных учреждениях жёстко регулируется, например, в больничных палатах и операционных уровень шума должен быть ниже 40 дБ [7].

Для измерения светозащитной эффективности решёток в вентиляционном канале, в котором на расстоянии 100 мм до открытого конца размещалась U-образная ультрафиолетовая лампа с мощностью УФ-излучения 33 Вт на длине волны 254 нм, а на выходе из канала помещалась исследуемая решётка. Измерения исходной облучённости без решетки выполнялись цифровым радиометром ИЛТ2400 в плоскости, расположенной на расстоянии 100 мм от края канала перпендикулярно его оси, по сетке 5×9 точек. После установки тестируемой решётки на открытый торец трубы измерения повторялись в тех же точках. Светозащитная эффективность определялась по коэффициенту ослабления, как логарифм отношения значений облучённости в точках до и после установки решётки. Для П-образной решётки среднее ослабление составило 3,88, а для уголковой решётки – 2,97, что согласуется с расчётами по модели трассировки лучей. Таким образом, уголковая решётка с таким ослаблением обеспечивает снижение УФ-интенсивности до значений, не превышающих предельно допустимых уровней, определённых СанПиН 2.2.4.3359-16 [8].

Заключение

Предложенная конструкция светозащитной решётки с ламелями в виде уголков с дополнительными направляющими плоскостями, которая значительно превосходит существующие аналоги для УФ-реакторов с протоком газа. Измеренная степень экранирования УФ-излучения с длиной волны 254 нм составляет 2,97, что сопоставимо со степенью ослабления у лучших образцов светозащитных решёток, а аэродинамическое сопротивление при скоростях потока более 1 м/с снижено на порядок по сравнению с широко распространённой решёткой с П-образными профилями. Кроме этого уголковая решётка с дополнительными прямолинейными направляющими участками стабилизирует поток в камере УФ-реактора, минимизируют его отрыв и уменьшает разброс скоростей до среднеквадратичного отклонения 0,27. Используемая в настоящее время решётка с П-образным профилем создает сильные пространственные отклонения потока за решёткой, образование вихрей и большие неоднородности скоростей в камере

реактора со среднеквадратичным отклонением скорости на расстоянии 100 мм от выхода из решёток 1,03. Такие различия объясняются четырёхкратным увеличением живого сечения угловой решётки по сравнению с П-образной и наличием прямолинейных направляющих. Получено снижение уровня шума до 36 дБ, что ниже предельного уровня 40 дБ по СанПиН [6] без потери производительности, что ранее было невозможно при использовании П-образных светозащитных решёток с уровнем шума 42 дБ. В камере облучения УФ-реактора получен более стабильный поток газа, что увеличивает эффективность обеззараживания воздуха. Применение усовершенствованных светозащитных решеток позволило увеличить скорость воздуха в реакторе, что позволило вдвое уменьшить габариты рециркулятора. Предложенная конструкция применяется в серийных устройствах УФ-рециркуляторов НПО «ЛИТ».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Василяк Л. М. / Успехи прикладной физики. 2018. Т. 6. № 1. С. 5–17.
2. Сизиков В. П. Устройство для обеззараживания воздуха. Патент на изобретение № 2462269C1 (РФ). 2011.
3. Savenkov D., Donskoy D., Limarenko N., Gladtskiy D. / E3S Web of Conferences. – Сасак, 2024. P. 05010-05018.
4. Menter F., Hüppe A., Matyushenko A., Kolmogorov D. / J. Appl. Sci. 2021. Vol. 11. № 6. P. 2459.
5. Roger M., Moreau S. / J. AIAA. 2004. Vol. 42. № 3. P. 536–544.
6. ГОСТ Р ИСО 3744-2013 «Определение уровней звуковой мощности и звуковой энергии источников шума по звуковому давлению».
7. САНПИН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания».
8. САНПИН 2.2.4.3359-16 «Санитарно-эпидемиологические требования к физическим факторам на рабочих местах».

PACS: 87.50; 92.60.Sz

UV protection grating for UV reactors with gas flow

D. E. Naumenko^{1,2,*}, N. A. Kolesnik¹, and L. M. Vasilyak³¹ LIT, Moscow Region, Dolgoprudny, 141701 Russia² Moscow Institute of Physics and Technology, Moscow Region, Dolgoprudny, 141701 Russia

* E-mail: ddannaum@yandex.ru

³ Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 125412 Russia

Received 20.11.2025; revised 12.12.2025; accepted 20.02.2026

An analysis of light-shielding protection grating designs (U-shaped, honeycomb, and louvered) for flow-through UV reactors revealed a contradiction between achieving a high level of UV radiation shielding and low aerodynamic drag. A louvered grating with angled lamellas complemented by straight inlet and outlet sections was proposed. Numerical modeling and experimental studies showed that the new design provides a level of UV radiation attenuation comparable to the best analogs, such as a U-shaped grating, while reducing aerodynamic drag by a factor of 9. Flow alignment in the UV reactor was achieved, noise levels were reduced to below 40 dB, and the reactor's dimensions were reduced without any loss of performance.

Keywords: UV radiation, UV reactor, UV disinfection, recirculator.

REFERENCES

1. Vasilyak L. M., Plasma Phys Rep. **47**, 318 (2021).
2. Sizikov V. P., Device for Air Disinfection. Patent for invention № 2462269C1 (RF). 2011 [in Russian].

3. Savenkov D., Donskoy D., Limarenko N., and Gladckih D., E3S Web of Conferences, 05010–05018 (2024).
4. Menter F., Hüppe A., Matyushenko A., and Kolmogorov D. J., Appl. Sci., **11** (6), 2459 (2021).
5. Roger M. and Moreau S. J., AIAA, **42** (3), 536–544 (2004).
6. GOST R ISO 3744-2013. Acoustics. Determination of sound power levels and sound energy levels of noise sources using sound pressure. Engineering methods for an essentially free field over a reflecting plane [in Russian].
7. SanPiN 1.2.3685-21. Hygienic Standards and Requirements for Ensuring the Safety and (or) Harmlessness of Environmental Factors for Humans [in Russian].
8. SanPiN 2.2.4.3359-16. Sanitary and Epidemiological Requirements for Physical Factors at Workplaces [in Russian].

Об авторах

Науменко Данила Евгеньевич, начальник технологического отдела воздушного оборудования, ООО НПО «ЛИТ» (141701, Россия, Московская обл., г. Долгопрудный, Лихачевский проезд, 25); студент, Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет) (141701, Россия, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., 9). E-mail: ddannaum@yandex.ru SPIN-код: 3670-9247, AuthorID: 1318520

Колесник Никита Александрович, ведущий конструктор группы разработки УФ-приборов, ООО НПО «ЛИТ» (141701, Россия, Московская обл., г. Долгопрудный, Лихачевский проезд, 25). E-mail: kolesnik@lit-uv.ru

Василяк Леонид Михайлович, д.ф.-м.н., главный научный сотрудник, Объединенный институт высоких температур РАН (125412, Россия, Ижорская ул. 13, стр. 2). E-mail: vasilyak@ihed.ras.ru SPIN-код: 5623-5167, AuthorID 19599. ORCID 0000-0001-6982-3038. Scopus 7004886755