

ность детали не превышала 3 месяца, поэтому разрушение материала является малоцикловым, что свидетельствует о наличии нагрузок с большой интенсивностью.

Визуальные обследования показали ряд типичных для таких процессов дефектов – поверхностная коррозия металла, затупление, растрескивание и выламывание режущей кромки, разрушение полотна детали, отламывание кусков в периферийной зоне. В зоне примыкания детали к утолщению с посадочным отверстием отмечено появление «шейки».

С помощью лазерного профилометра для изучения характера износа построены профилограммы детали, из которых видно, что произошел значительный износ материала (порядка 10–20 % общей массы детали). Толщина детали в сечениях, наиболее удаленных от оси вращения, уменьшилась из-за большей окружной скорости в этих сечениях ножа примерно в два раза, при этом его поверхность не подверглась деформации и осталась плоской. Ввиду слоистости структуры материала определены механические характеристики образцов вдоль и поперек слоев. Прочность материала вдоль волокон на 12...17 % выше прочности материала поперек волокон, что должно быть учтено при изготовлении детали.

Эксперименты показали, что из-за высоких градиентов напряжений в процессе эксплуатации измельчителей появляются трещины на глубину до 3,7 мм. Таким образом, проблема повышения надежности и долговечности детали может быть решена 2-мя путями:

- анализом НДС с разработкой рекомендаций для оптимизации геометрии детали;
- использованием поверхностной плазменной закалки для создания поверхностного слоя измельчителя с высокой твердостью и износостойкостью.

Анализируя характер работы установки, имеющих механических повреждений, можно сделать вывод, что касательные силы инерции не влияют на работоспособность детали. Кроме того, на отработавших свой ресурс деталях замечены характерные дефекты, которые также позволяют сделать вывод о характере и уровне действующих нагрузок.

Проведены исследования износостойкости измельчителей. С помощью программного обеспечения измерительного комплекса MISTRAL 070705 создана модель детали (рис. 2, б). На основании полученных данных для фрагментов четырех анализированных деталей построены кривые, описывающие геометрию исследуемой части детали в плоскостях А–F.

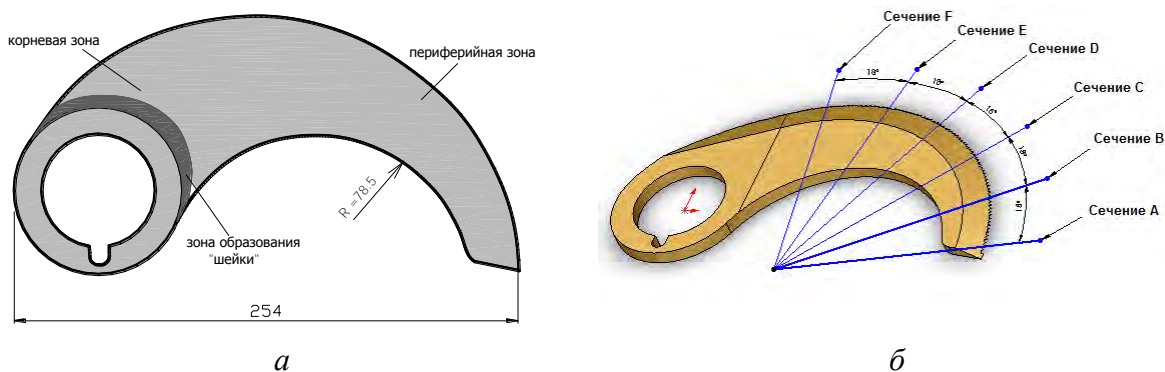


Рис. 2. Эскиз детали (а) и ее компьютерная модель (б)

Для осуществления процесса поверхностной плазменной закалки в комплексе с плазменной установкой был разработан специальный манипулятор, при помощи которого осуществляется перемещение детали относительно плазменной дуги с заданной скоростью (частота вращения стола манипулятора может регулироваться в пределах 0,5–180 об/мин). Упрочняемая деталь располагалась на столике манипулятора горизонтально. Нанесение плазменных дорожек осуществлялось с шагом 1,5–2,0 мм (рис. 1, б).

Рабочие параметры устанавливались следующим образом: ток дуги $I=28$ А, расход плазмообразующего газа (аргон) $Q_{Ar}=1,2$ л/мин, расход защитного газа (азот) $Q_{N_2}=3,6$ л/мин, относительная скорость перемещения детали $v=10$ мм/с.

В результате микротвердость поверхности детали увеличена до 466–600 HV_{0,1}. Экспериментально подтверждена возможность закалки при наложении соседних дорожек друг на друга с расстояниями 0,4 мм между их осями; при этом микротвердость составила 532 – 566 HV. Упрочненные таким способом детали были установлены на длительные испытания.

В силу конструктивных особенностей деталь имеет режущую кромку с соответствующим углом заточки. Для упрочнения режущей кромки сначала выполнялся раскрой заготовок по существующей технологии. Затем осуществлялся процесс ППЗ заготовок по разработанной методике. Заключительной операцией являлась механическая заточка заготовок для образования режущей кромки измельчителя.

Для вычисления критерия износа детали Φ_{nm} применялась следующая формула:

$$\Phi_{nm} = \frac{S_{1m} - S_{nm}}{S_{1m}} \cdot 100 \%, \quad (1)$$

где Φ_{nm} – относительный процент износа детали, S_{nm} – поле поверхности анализируемого сечения для соответствующей детали n в соответствии с плоскостью m ; n – номер детали ($n=1, 2, 3, 4, 5$).

По результатам проведенных расчетов построены графики относительного износа элементов детали, упрочненной объемной и поверхностной закалками (рис. 3, а, б).

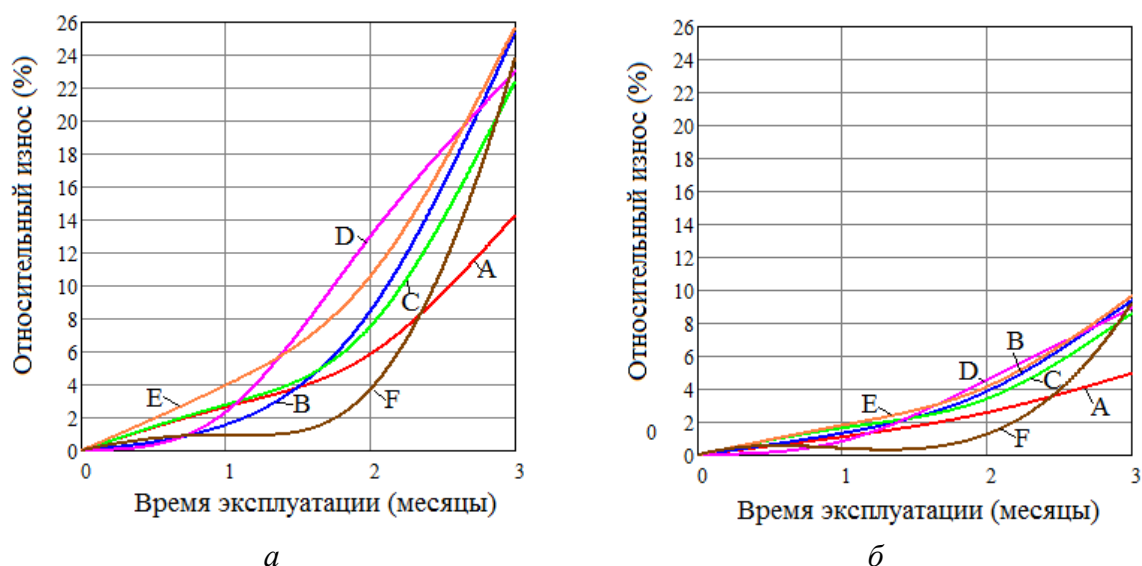


Рис. 3. Графики относительного износа измельчителей из стали 14X17H2, упрочненных: а – объемной закалкой, б – поверхностной закалкой

Анализируя полученные зависимости можно заключить, что износостойкость измельчителей, упрочненных путем ППЗ, в 2,3 раза выше, чем износостойкость измельчителей, упрочненных объемной закалкой.

Методика исследований НДС ножей при поверхностной закалке рабочей зоны

Для определения оптимальных режимов процесса поверхностной плазменной закалки проведено исследование нестационарных температурных полей, напряжений и деформаций, выполненное с применением конечно-элементного комплекса ANSYS [2]. Следует отметить, что основой термостатического анализа в ANSYS является уравнение теплового баланса, которое получается из принципа сохранения энергии. Конечно-элементное решение заключается в получении значений узловых температур и напряжений, на основе которых вычисляются остальные необходимые величины [3, 4].

В ходе проведения вычислительного эксперимента разработана трехмерная модель ножа, приведенная на рис. 4.

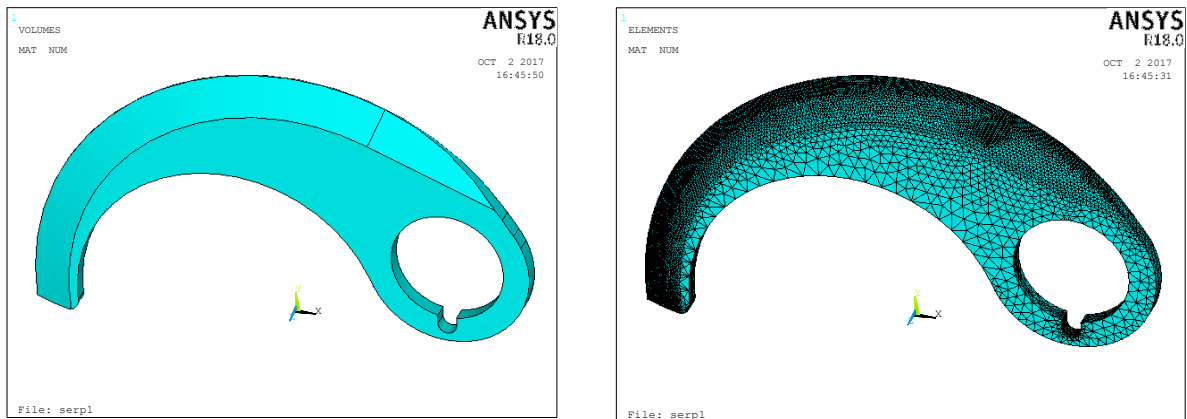


Рис. 4. Трехмерная модель ножа (а) и схема разбиения конечными элементами (б)

При решении температурной задачи в ANSYS использовался предназначенный для анализа переходных процессов восьмиузловой термической элемент SOLID70 (Thermal Mass Solid Brick 8node 70), который имеет одну степень свободы (температура в каждой точке). Модель разбивалась на 53572 конечных элемента. В соответствии со скоростью движения плазменной струи к узлам дискретной модели ножа пошагово последовательно прикладывалась температурная нагрузка в виде конвекции. Во избежание оплавления максимальная температура поверхности ножа должна быть на 3...5 % меньше температуры плавления стали (~1400 °С). На всех поверхностях модели задавалась конвекция, т.к. температура плазменной струи в центре составляет около 20000 °С. Известно [1], что тепловой поток плазменной струи распределяется по ширине пятна нагрева по закону, близкому к кривой вероятности Гаусса. Исходя из этого на той поверхности, по которой движется плазменная струя, коэффициент конвекции задавался различным по ширине пятна нагрева, соответствующим нормальному распределению. Его значение выбиралось в зависимости от того, чтобы максимальная температура на нагреваемой поверхности не превышала 1350 °С. Распределение температуры по пятну нагрева приведено в [5].

Функции температуры и коэффициента конвекции имеют следующий вид:

$$T(x, y, t) = \frac{T_0}{10^{-3} \left[\left(R \cdot \cos\left(\frac{v}{R}t - 0,122\right) + x \right)^2 + \left(R \cdot \sin\left(\frac{v}{R}t - 0,122\right) - y \right)^2 \right] + 1} + T_H, \quad (2)$$

$$k(x, y, t) = \frac{k_0}{10^{-3} \left[\left(R \cdot \cos\left(\frac{v}{R}t - 0,122\right) + x \right)^2 + \left(R \cdot \sin\left(\frac{v}{R}t - 0,122\right) - y \right)^2 \right] + 1},$$

где $T_0=20\ 000\ ^\circ\text{C}$ – температура в центре плазменной струи, $R=0,13\ \text{м}$ – радиус кривизны траектории движения плазменной струи, определяемый из геометрии режущей кромки ножа, $v=10\ \text{мм/с}$ – скорость движения плазматрона, $T_H=20\ ^\circ\text{C}$ – температура окружающей среды, $k_0=7\ 000\ \text{Вт/м}^2\cdot\text{К}$ – коэффициент конвекции в центре плазменной струи.

Удельная теплоемкость стали принималась зависящей от температуры и при температурах 0...1300 °С находилась в интервале $c_{ст}=400\ \dots\ 600\ \text{Дж/(кг}\cdot\text{К)}$ [6]. Время движения t определялось в зависимости от длины дуги режущей кромки при скорости

движения плазмотрона $v=10$ мм/с. Некоторые характеристики материала приведены в таблице 1.

Таблица 1. Характеристики материала измельчителя

Материал	Коэффициент теплопроводности λ , Вт/(К·м)	Модуль упругости E , Па	Коэффициент Пуассона ν	Удельная теплоемкость c , Дж/(кг·К)
Сталь 14X17H2	50	$2 \cdot 10^{11}$	0,28	400...600

После каждого шага нагружения проводился расчет температурных полей, результаты которого записывались в LS-файлы. В результате проведения расчета определены поля температур в различные моменты времени.

На рис. 5 представлено распределение температурных полей на рабочей зоне измельчителя в различные моменты времени при скорости движения пятна нагрева $V=10$ мм/с.

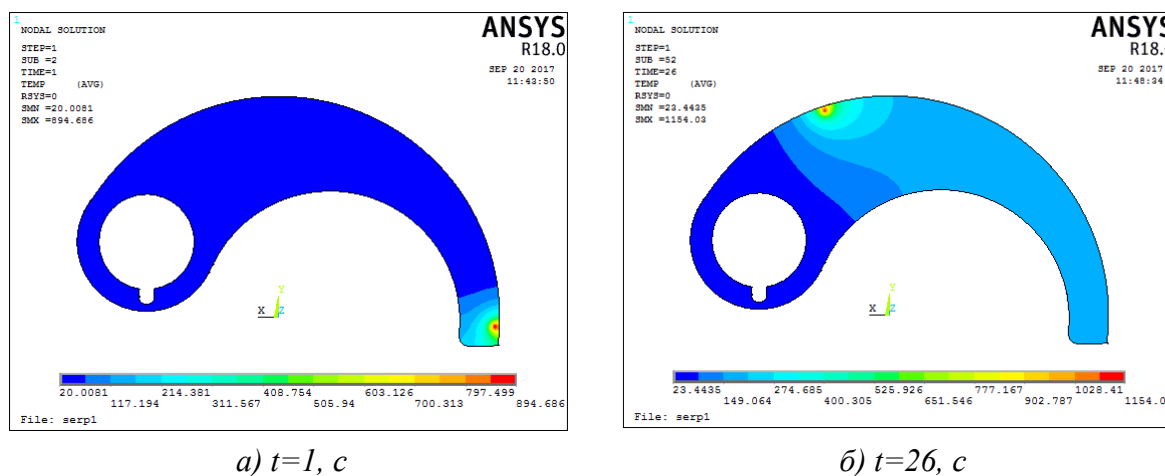


Рис. 5. Распределение температурных полей на нижней поверхности ножа для различных моментов времени

На рис. 6 приведены типичные распределения температуры и эквивалентных напряжений (по Мизесу) на режущей кромке в различных сечениях (рис. 3) от времени.

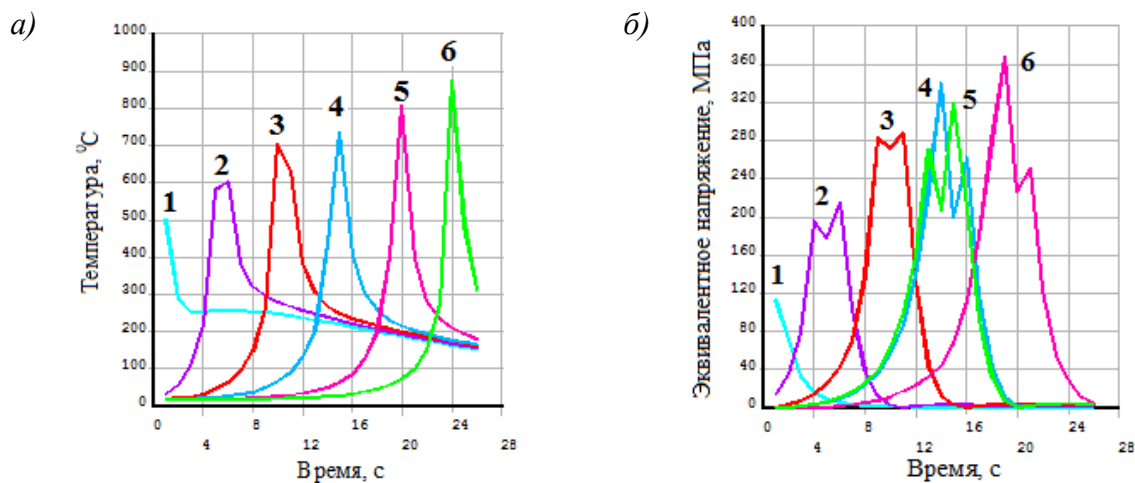


Рис. 6. Зависимость температуры (а) и эквивалентных напряжений (б) на режущей кромке от времени в различных сечениях (рис. 3): 1 – сечение А, 2 – сечение В, 3 – сечение С, 4 – сечение D, 5 – сечение Е, 6 – сечение F

Графики показывают, что наибольшее значение температура достигает в тот момент времени, когда центр источника тепла находится в сечении F.

Исследовано распределение температурных полей по глубине сечения измельчителя, вдоль которого перемещается источник нагрева. На рис. 7 приведены типичные распределения температурных полей для различных сечений при скорости движения плазмотрона $V=10$ мм/с.

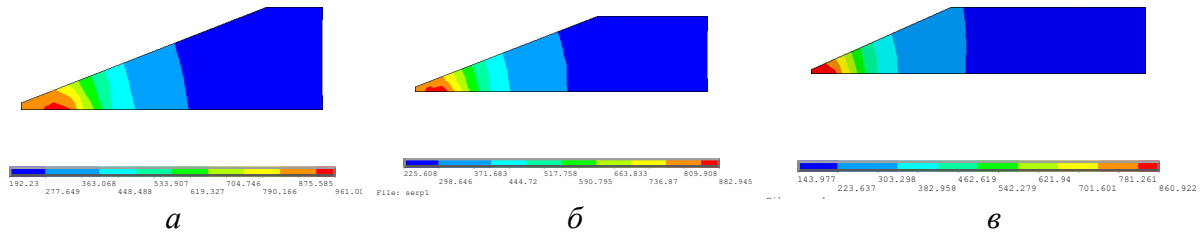


Рис. 7. Распределение температурных полей в различных сечениях в момент времени, соответствующему нахождению центра источника тепла: а) в сечении А, б) в сечении В, в) в сечении D

При решении задачи термоупругости нож «закреплялся» по нижней торцевой поверхности для ограничения перемещения в направлении, перпендикулярном поверхности ножа, и по поверхности шпоночного паза для ограничения перемещения в направлении, параллельном поверхности ножа. Для получения общего решения задачи термоупругости выполнялось совместное решение по определенному количеству LS-файлов, соответствующее 13 шагам нагружения, записанных при выполнении теплового расчета.

На рис. 8 представлено распределение эквивалентных напряжений и суммарных перемещений на рабочей зоне измельчителя в различные моменты времени при скорости движения пятна нагрева $v=10$ мм/с.

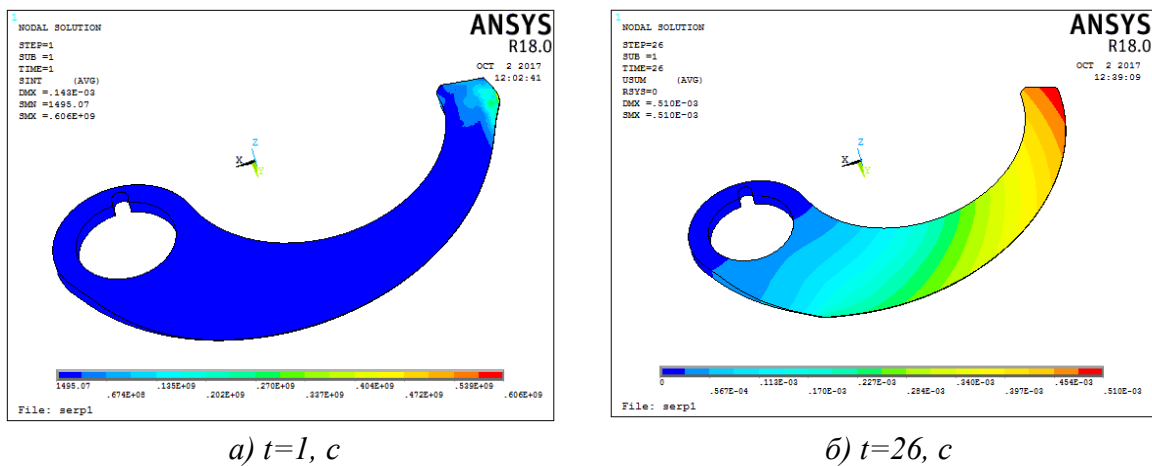


Рис. 8. Распределение эквивалентных напряжений (а) и суммарных перемещений (б) на рабочей зоне измельчителя в различные моменты времени

На рис. 9 приведены типичные распределения напряжений и перемещений для различных сечений при скорости движения плазмотрона $v=10$ мм/с.

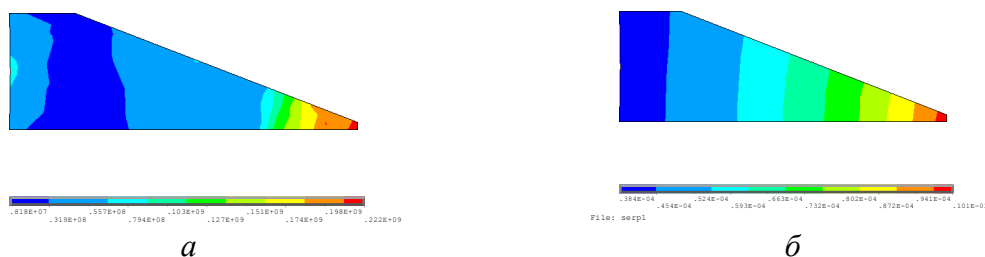


Рис. 9. Распределение эквивалентных напряжений (а) и суммарных перемещений (б) в различных сечениях в момент времени, соответствующему нахождению центра источника тепла в сечении А

Заключение. Осуществлен процесс поверхностной плазменной закалки измельчителей пищевого сырья из стали 14X17H2 путем нанесения дорожек с шагом 1,5 мм на тело детали. Необходимая скорость движения источника и траектория плазменной струи автоматически выполнялась манипулятором. Определены оптимальные параметры процесса ППЗ: скорость движения источника $v = 10$ мм/с, расход аргона $Q_{Ar} = 1,2$ л/мин, расход азота $Q_{N_2} = 3,6$ л/мин, ток дуги $I = 28$ А.

Выполненные с помощью измерительного комплекса Mistral 070705 исследования упрочненных ППЗ измельчителей на износостойкость показали значительное увеличение их долговечности, а срок их эксплуатации увеличен в 2,3 раза.

Исследовано НДС измельчителя в процессе поверхностной плазменной закалки с помощью разработанной механико-математической ANSYS-модели, учитывающей распределение температуры по диаметру пятна нагрева и зависимость характеристик материала от температуры, что позволило уточнить параметры ППЗ и обеспечить прочность и жесткость деталей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кундас, С.П. Компьютерное моделирование процессов термической обработки сталей: монография / С.П. Кундас. – Мн.: Бестпринт, 2005. – 313 с.
2. Басов, К.А. ANSYS: справочник пользователя / К.А. Басов. – М.: ДМК Пресс-2005.- 640с., ил.
3. Чигарев, А.В. ANSYS для инженеров / А.В. Чигарев, А.С. Кравчук, А.Ф. Смалюк. - М.: Машиностроение. – 2004. – 510 с.
4. Каплун, А.Б. ANSYS в руках инженера: Практическое руководство / А. Б. Каплун, Е.М. Морозов, М.А. Олферьева. – М.: Едиториал УРСС, 2003. – 272 с.
5. Веремейчик, А.И. Расчет нестационарных термоупругих напряжений при воздействии локального высококонцентрированного источника тепла / А.И. Веремейчик, В.В. Гарбачевский, М.И. Сазонов, В.М. Хвисевич, Д.Л. Цыганов // Механика и наномеханика структурно-сложных и гетерогенных сред. Успехи, проблемы, перспективы, Москва, 23-31 декабря 2014 г. / Институт прикладной механики РАН. – Москва: ИПРИМ РАН, 2014. – С. 244–252.
6. Таблицы физических величин. Справочник. / Под ред. И.К. Кикоина. – М.: Атомиздат, 1976. – 1008 с.