

# ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

---

---

УДК 004.94:621.565.83

*Д. В. Такташкин, В. И. Горбаченко*

## **ОБЪЕКТНО-ОРИЕНТИРОВАННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОХЛАЖДЕНИЯ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА**

Статья посвящена актуальным проблемам моделирования тепло- и массообменных процессов в условиях охлаждения лезвийного инструмента распыленными смазочно-охлаждающими технологическими средствами. Разработана объектно-ориентированная модель, позволяющая рассчитывать процесс охлаждения режущего инструмента без использования сложных систем дифференциальных уравнений, обосновывается корректность предложенных моделей по результатам соответствующего экспериментального исследования. Предложено программное средство, обеспечивающее программную реализацию объектно-ориентированной модели процесса охлаждения режущего инструмента распыленными технологическими средствами.

### **Введение**

Одним из наиболее перспективных способов повышения производительности процессов механической обработки лезвийным инструментом и снижения затрат на применение смазочно-охлаждающих технологических средств (СОТС) является их подача в зону обработки в распыленном состоянии [1, 2]. Эффективность действия аэрозоля СОТС во многом определяется аэродинамикой газового факела, движением капель распыленной жидкости в потоке аэрозоля, кинетикой элементарных актов тепло-, массопереноса в двухфазном газожидкостном потоке и в зоне резания [1, 3].

Одним из основных факторов, сдерживающих до настоящего времени массовое внедрение в производство технологии охлаждения режущего инструмента распыленными СОТС, является отсутствие соответствующих инженерных методик расчета параметров данного технологического процесса. Это заставляет разработчиков каждый раз экспериментально определять оптимальные параметры работы распыляющего устройства для каждой токарной операции, что в первую очередь связано с большими финансовыми затратами и значительными потерями рабочего времени. Сложность моделирования процесса охлаждения режущего инструмента распыленными технологическими средствами заключается главным образом в отсутствии математических моделей, комплексно описывающих этот процесс с учетом всех его наиболее значимых параметров. Ограниченное число работ сводится к рассмотрению лишь отдельно взятых физических процессов, таких как аэродинамика газового факела, движение капли жидкости в воздушном потоке, тепло- и

массообмен в зоне резания и т.д. [4–6]. Возможным вариантом выхода из сложившейся ситуации может стать применение для решения данной проблемы объектно-ориентированного моделирования [7].

Целью работы является объектно-ориентированное моделирование процесса охлаждения режущего инструмента распыленными СОТС при токарной обработке и разработка комплекса программ, позволяющего определять основные температурные и аэродинамические характеристики технологической системы. При этом решаются задачи: объектно-ориентированная декомпозиция технологического процесса; разработка математических моделей аэродинамики факела аэрозоля; кинетики тепло-, массопереноса между отдельной каплей и воздушным потоком; теплообмена в зоне обработки; разработка комплекса программ, позволяющего проводить детальное исследование процесса охлаждения режущего инструмента распыленными технологическими средствами.

### **1 Объектно-ориентированная декомпозиция системы**

В результате объектно-ориентированной декомпозиции были выделены пять основных объектов системы: «Капля СОТС», «Воздушная струя», «Зона обработки», «Воздушный поток» и «Тепловой поток» [8]. Все объекты системы взаимодействуют между собой на уровне методов (рис. 1). Так, объект «Капля СОТС» в процессе взаимодействия с объектом «Воздушная струя» меняет свои атрибуты в результате протекания в системе процессов искажения траектории капли под действием аэродинамических сил, ее дробления и испарения. Введем в рассматриваемую модель контейнер, который в объектно-ориентированном моделировании является логическим блоком со своим интерфейсом и своими атрибутами, объединяющим группу объектов [9]. Таким образом, композиция из объектов «Капля СОТС» и «Воздушная струя» составляет контейнер – «Струя аэрозоля СОТС». Отдельно стоит отметить поведение такого объекта, как «Зона обработки», деятельность которого инициирует появление в общей системе двух новых объектов «Воздушный поток» и «Тепловой поток». Родительский объект и два его дочерних объекта составляют вместе еще один контейнер – «Технологическая система», который в одностороннем порядке оказывает влияние на объекты «Воздушная струя» и «Капля СОТС», изменяя значения их атрибутов. Данные поправки учитывают искажение струи аэрозоля технологического средства в зоне резания, вызванное деятельностью объекта «Воздушный поток», и учитывают процесс вторичного теплового дробления капель в зоне резания, вызванный деятельностью объекта «Тепловой поток». В то же самое время контейнер «Струя аэрозоля СОТС» в процессе отвода тепла из зоны обработки активно взаимодействует с объектом «Тепловой поток», изменяя его атрибуты.

В объектно-ориентированной модели (ОМ) использован постоянный шаг изменения модельного времени (принцип  $\Delta t$ ) [7]. Вся деятельность системы осуществляется на оси модельного времени, характеризующейся величиной  $\Delta t$ , которая определяется исходя из требований к точности моделирования процесса. Значения атрибутов всех объектов системы привязываются к моменту окончания каждого шага оси дискретного времени.

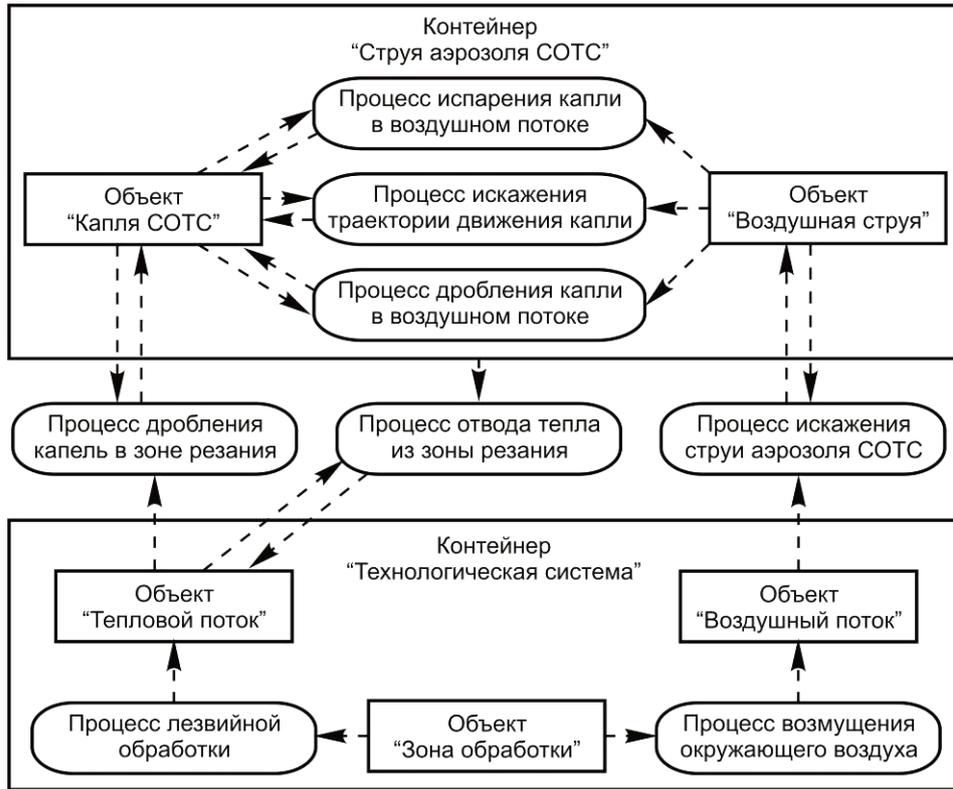


Рис. 1 Схема взаимодействия объектов системы

## 2 Объектно-ориентированная модель аэрогидродинамики двухфазной газожидкостной струи

В основу математической модели поведения объекта «Воздушная струя» положена теория Г. Н. Абрамовича [10]. С целью устранения вносимой в расчеты ощутимой погрешности, обусловленной введенными в уравнения эмпирическими константами, предложена уточненная формула [11] текущего радиуса воздушного потока  $R_i$ :

$$R_i = \left( 1 + \frac{a S_i}{0,29 \cdot R_0} \right) R_0,$$

где  $a$  – безразмерный коэффициент структуры струи, характеризующий ее начальную турбулентность;  $S_i$  – расстояние между рассматриваемым сечением и срезом сопла;  $R_0$  – радиус выходного сопла распыляющего устройства.

Для корректного расчета таких атрибутов объекта «Воздушная струя», как ширина невозмущенного потока и полная ширина пограничного слоя начального участка, исходя из геометрии распределения поля скоростей, введена в расчет новая величина  $R'_i$ , характеризующая сужение ядра постоянных скоростей на оси струи [11]:

$$R'_i = R_0 - \frac{a S_i}{0,67}.$$

При рассмотрении поля температур в воздушной струе использовано уже известное из теории Г. Н. Абрамовича выражение, позволяющее по известному распределению безразмерных скоростей потоков рассчитать поле температур в воздушной струе [10].

На основе законов гидроаэромеханики [12] выведены [13] уравнения движения частиц СОТС в воздушном потоке под действием аэродинамической силы  $F_c$ , силы тяжести  $F_t$  и силы Стокса  $F_{st}$ . При этом горизонтальная составляющая силы  $F_{gor}$ , действующей на каплю СОТС, определяется уравнением

$$F_{gor} = C \rho_v S_k \frac{v_{sr}^2}{2},$$

где  $\rho_v$  – плотность среды;  $S_k$  – характерная площадь сечения капли;  $v_{sr}$  – скорость среды;  $C$  – безразмерный коэффициент лобового сопротивления, зависящий от формы и положения обтекаемого тела, чисел Рейнольдса, Маха и Фруда.

Вертикальная составляющая силы  $F_{ver}$  рассчитывается из условия стационарного движения [13]:

$$F_{ver} = \frac{\pi d_k^3}{6} g (\rho_k - \rho_v) - 3\pi d_k \eta_v v_{sr},$$

где  $d_k$  – диаметр частицы;  $g$  – ускорение свободного падения;  $\rho_k$  – плотность вещества частицы;  $\eta_v$  – динамическая вязкость воздуха.

Для построения математической модели поведения объекта «Воздушный поток» рассмотрено вращение диска диаметром  $d_d$  с постоянной угловой скоростью  $\omega_{ad}$  в покоящейся среде. Касательная составляющая скорости воздушного потока  $u_{ad}$  и его радиальная составляющая  $v_{ad}$  пропорциональны  $\frac{d_d \omega_{ad}}{2}$  и выражаются следующими зависимостями [14]:

$$u_{ad} = \frac{d_d \omega_{ad}}{2} F\left(z_i \sqrt{\frac{\omega_{ad}}{\nu_v}}\right), v_{ad} = \frac{d_d \omega_{ad}}{2} G\left(z_i \sqrt{\frac{\omega_{ad}}{\nu_v}}\right),$$

где  $z_i$  – расстояние от диска;  $\delta_{ad}$  – толщина увлекаемого слоя среды;  $\nu_v$  – кинематическая вязкость среды.

Разработанные объектно-ориентированные модели, описывающие аэродинамику газожидкостной струи аэрозоля СОТС, предоставили возможность оценить распределение жидкой фазы в объеме струи и непосредственно в зоне обработки.

### **3 Объектно-ориентированная модель тепло- и массопереноса в зоне резания**

Математическая модель поведения объекта «Капля СОТС» в контейнере «Струя аэрозоля СОТС» базируется на теории испарения Зака [15], которая дает достаточно хорошую зависимость скорости испарения от температу-

ры окружающей среды. Но гиперболическая зависимость скорости от диаметра капли ограничивает применение данной теории для построения математической модели, т.к. при диаметре капли  $d_k \rightarrow 0$  скорость ее испарения  $W \rightarrow \infty$ . В связи с этим предложено использовать в качестве верхней границы применимости закона испарения формулу В. В. Шулейкина [15], учитывающую влияние скачка концентраций пара у поверхности капли на скорость ее испарения:

$$W_V = \frac{W_0}{1 + \frac{\alpha}{D} \frac{r_k}{2\pi\mu} \left( \frac{RT_{sr}}{2\pi\mu} \right)^{1/2}},$$

где  $W_0$  – скорость испарения в вакууме;  $\alpha$  – коэффициент аккомодации;  $r_k$  – радиус капли;  $D$  – коэффициент диффузии паров;  $R$  – газовая постоянная, отнесенная к одному моллю;  $T_{sr}$  – температура среды, в которую происходит испарение;  $\mu$  – молекулярный вес.

На основе законов деформации и разрушения капель распыленного технологического средства в воздушном потоке разработана математическая модель поведения контейнера «Струя аэрозоля СОТС» при наличии в нем коалесценции и дробления. На основе формул Лапласа и Клапейрона–Клаузиуса для случая перегрева капли технологического средства тепловым потоком выведено уравнение, характеризующее критическое время микровзрыва капли распыленной жидкости:

$$t_c = \sqrt{\frac{d_k^3 L \rho_n c_k \rho_k}{24 \varepsilon_k \sigma_k T_v^4 \lambda_k}},$$

где  $L$  – теплота парообразования;  $\rho_n$  – плотность пара при температуре кипения;  $c_k$  – удельная теплоемкость жидкости;  $\rho_k$  – плотность жидкости;  $\varepsilon_k$  – степень черноты капли;  $\sigma_k$  – коэффициент поверхностного натяжения жидкости;  $T_v$  – температура газовой среды;  $\lambda_k$  – коэффициент теплоотдачи излучением.

Разработанная ООМ взаимодействия объектов «Капля СОТС» и «Тепловой поток» позволяет, зная температурные поля в зоне резания, определять дисперсность распыленного технологического средства и необходимую скорость струи аэрозоля.

Для количественной оценки отведенного из зоны резания тепла и определения динамики охлаждения режущего инструмента аэрозолем СОТС на основе классических законов термодинамики [16] выведена формула полной теплоты, затрачиваемой на взрывное кипение капли СОТС в зоне резания:

$$Q = \frac{\rho_k \pi d_k^3}{6} (c_k \Delta T + r_u),$$

где  $\Delta T$  – температурный перепад при прогреве жидкости до температуры кипения;  $r_u$  – удельная теплота парообразования жидкости.

На базе теории теплофизики резания А. Н. Резникова [17] выведено уравнение, описывающее изменение контактной температуры во времени на операции точения, в которое введены коэффициенты нестационарности режима токарной обработки. В окончательной форме данное уравнение имеет вид [18]

$$\theta_{rez} = \frac{5M_1 w_p t}{\lambda_p (l_p + l_z)^4 \sqrt[4]{\varepsilon_{rez}}} \frac{0.141 \frac{\sqrt{w_p}}{\lambda} \sqrt{\frac{kl_p}{v_r}} q_0 + (1+c) \theta_d}{\frac{5M_1 K_1 w_p t}{\lambda_p l_p^4 \sqrt[4]{\varepsilon_{rez}}} + \frac{\Delta}{40\lambda} + 0.184 \frac{\sqrt{w_p}}{\lambda} \sqrt{\frac{kl_p}{v_r}} + K_2},$$

где  $w_p$ ,  $\lambda_p$  и  $w$  и  $\lambda$  – коэффициенты теплопроводности и теплопроводности режущего инструмента и обрабатываемого материала соответственно;  $l_p$  и  $l_z$  – длина передней и задней площадки контакта;  $v_r$  – скорость резания;  $\varepsilon_{rez}$  – коэффициент длительности холостого и рабочего хода;  $q_0$  – тепловой поток на надрезочной стороне стружки;  $\theta_d$  – температура деформации;  $k$  – коэффициент продольной усадки стружки;  $\Delta$  – наибольшая толщина заторможенного слоя;  $c$ ,  $M_1$ ,  $K_1$  и  $K_2$  – коэффициенты нестационарности режима токарной обработки.

Разработанные ООМ, описывающие кинетику тепло-, массообменных процессов в зоне резания при охлаждении режущего инструмента распыленными технологическими средствами, дают возможность определить оптимальный расход СОТС, необходимый для обеспечения требуемого теплового баланса в зоне обработки.

#### **4 Оценка адекватности предложенной объектно-ориентированной модели**

Экспериментальное исследование и оценка адекватности предложенной математической модели проводились в три этапа. Целью первого этапа было измерение гидродинамических и температурных характеристик газовой фазы в факеле мелкодисперсного аэрозоля. Для измерения скорости был применен пневматический метод с использованием трубки Пито–Прандтля и микроанометра. Как видно из графиков (рис. 2, 3), предложенная ООМ поведения объекта «Воздушная струя» описывает результаты экспериментов с погрешностью, не превышающей 10 %, что доказывает достаточно хорошее согласование экспериментов с предложенной моделью.

Целью второго этапа экспериментов было исследование дисперсности распыленной СОТС в различных сечениях факела аэрозоля при изменении давления сжатого воздуха на входе в распыляющее устройство. Измерение размеров мелких частиц в потоке аэрозоля осуществлялось дифракционным методом Фраунгофера. Результаты измерения и численного эксперимента, проведенного на базе ООМ поведения контейнера «Струя аэрозоля СОТС», представлены на рис. 4. Как видно из графиков, разница между результатами расчетов и измерений как по абсолютной величине, так и по зависимости  $R_k(S)$  на всем интервале значений  $S$  не выходит за пределы 15 %, что гарантирует надежность результатов, полученных в ходе проведения численных экспериментов.

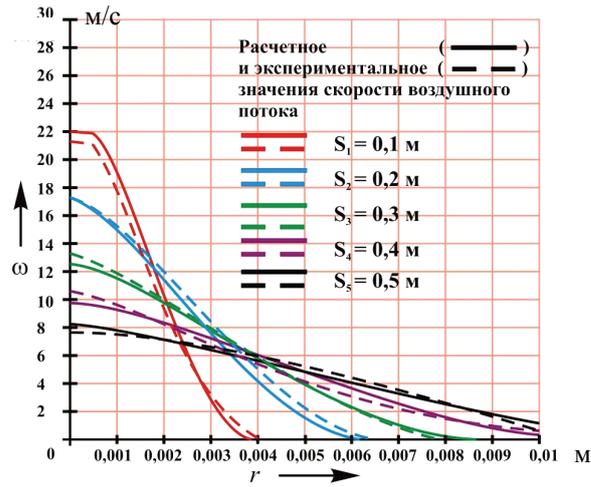


Рис. 2 Изменение скорости в сечении струи

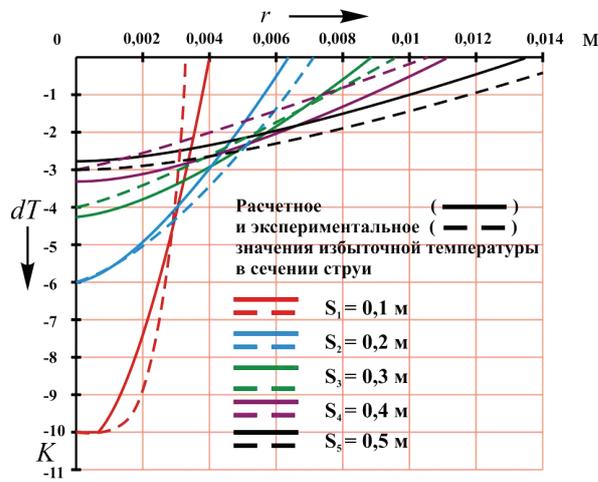


Рис. 3 Изменение избыточной температуры в сечении струи

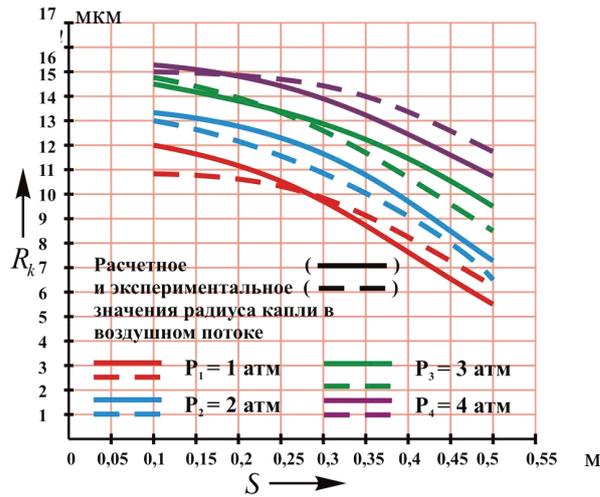


Рис. 4 Изменение радиуса капель в воздушном потоке по длине струи

Целью третьего этапа экспериментов ставилось измерение локальных температур в зоне резания. Для измерения температуры контактной площадки при токарной обработке был разработан специальный проходной резец со встроенной искусственной термопарой. По результатам данных экспериментального исследования и расчетов, проведенных по ООМ поведения контейнера «Технологическая система» (рис. 5), можно сделать вывод, что максимальное расхождение между результатами численных экспериментов и данных, полученных из опытов, не превышает 15 %. Это в свою очередь свидетельствует о применимости при описании тепловых процессов в зоне резания численного эксперимента на базе предложенной математической модели.

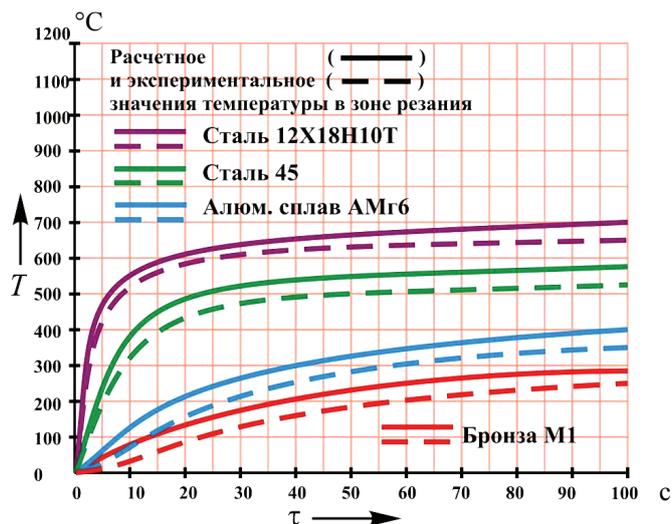


Рис. 5 Колебания температуры при прерывистом точении

### 5 Программная реализация предложенной объектно-ориентированной модели

На основании предложенной ООМ процесса охлаждения режущего инструмента распыленными СОТС разработано программное средство [8] (рис. 6), которое позволяет: рассчитать аэродинамические и температурные параметры газовых струй; рассчитать поле скоростей воздушных потоков у поверхности вращающихся деталей и дисков; провести оценку контактных температур и тепловых потоков в зоне резания; смоделировать на компьютере поведение двухфазных газожидкостных струй, свободно распространяющихся в воздушной среде; провести полный расчет процесса охлаждения режущего инструмента распыленными технологическими средствами.

Тестирование программного средства показало, что все расчеты, реализуемые в рамках его функционирования, позволяют адекватно оценивать процесс охлаждения режущего инструмента распыленными СОТС с погрешностью, не превышающей 10–15 % по сравнению с экспериментальными данными.



### **Заключение**

В результате объектно-ориентированного моделирования процесса охлаждения режущего инструмента распыленными смазочно-охлаждающими технологическими средствами при токарной обработке получены следующие основные научные результаты:

1. Проведена объектно-ориентированная декомпозиция процесса охлаждения режущего инструмента распыленными технологическими средствами и определены основные требования, предъявляемые к программной реализации его объектно-ориентированной модели.

2. Разработана объектно-ориентированная модель, описывающая динамику взаимодействия контейнеров «Технологическая система» и «Струя аэрозоля СОТС», отличающаяся от известных математическим описанием поведения объекта «Тепловой поток» и позволяющая определять оптимальный расход технологического средства, необходимый для обеспечения требуемого теплового баланса.

3. На базе предложенной объектно-ориентированной модели разработано программное средство, позволяющее проводить полный расчет процесса охлаждения режущего инструмента распыленными технологическими средствами с погрешностью, не превышающей 15% по сравнению с экспериментальными данными.

### **Список литературы**

1. **Худобин, Л. В.** Техника применения смазочно-охлаждающих средств в металлообработке / Л. В. Худобин, Е. Г. Бердичевский. – М. : Машиностроение, 1977. – 190 с.
2. **Курносков, Н. Е.** Система подготовки и подачи распыленных СОТС в зону резания и опыт ее применения на машиностроительных предприятиях / Н. Е. Курносков, А. В. Тарнопольский, А. А. Николотов, А. В. Матвеев // 70-летие О. И. Шаврина : материалы Всерос. науч.-практ. конф. – Ижевск : Институт прикладной механики УрО РАН, 2006. – С. 232–235.
3. **Проскураков, Ю. Г.** Тонкораспыленное охлаждение режущих инструментов / Ю. Г. Проскураков, В. Н. Петров. – М. : Машгиз, 1962. – 112 с.
4. **Борискина, И. П.** Моделирование процессов взаимодействия частиц в двухфазной среде : дис. ... канд. физ.-мат. наук : 05.13.18 – Саранск, 2003. – 127 с.
5. **Чирков, Д. В.** Численный метод расчета течений сжимаемого вязкого газа в широком диапазоне чисел Маха : дис. ... канд. физ.-мат. наук : 05.13.18 – Новосибирск, 2004. – 136 с.
6. **Теряева, Н. Ю.** Моделирование двухфазной среды и метод дискретных вихрей : дис. ... канд. физ.-мат. наук : 05.13.18 – Дубна, 2004. – 123 с.
7. **Лоу, А. М.** Имитационное моделирование / А. М. Лоу, В. Д. Кельтон. – 3-е изд. – СПб. : Питер, 2004. – 846 с.
8. **Такташкин, Д. В.** Программная реализация объектно-ориентированной модели процесса охлаждения режущего инструмента распыленными технологическими средствами / Д. В. Такташкин // Материалы и технологии XXI века : материалы Междунар. науч.-техн. конф. – Пенза : ПДЗ, 2008. – С. 106–109.
9. **Колесов Ю. Б.** Моделирование систем. Динамические и гибридные системы / Ю. Б. Колесов, Ю. Б. Сениченков. – СПб. : БХВ-Петербург, 2006. – 224 с.
10. **Абрамович, Г. Н.** Прикладная газовая динамика / Г. Н. Абрамович. – М. : Изд-во технико-теоретической литературы, 1953. – 736 с.
11. **Курносков, Н. Е.** Управление формообразованием и аэродинамикой струи распыленной СОТС / Н. Е. Курносков, Д. В. Такташкин, А. В. Матвеев // Окружающая

- природная среда и экологическое образование и воспитание : материалы 5-й Всерос. науч.-практ. конф. – Пенза : ПДЗ, 2005. – С. 38–40.
12. **Прандтль, Л.** Гидроаэромеханика / Л. Прандтль. – Ижевск : НИЦ Регулярная и хаотическая динамика, 2000. – 576 с.
  13. **Такташкин, Д. В.** Закономерности гидродинамики двухфазного газожидкостного потока / Д. В. Такташкин // Ресурсосбережение и инновации: проблемы и методы решения : материалы Междунар. науч.-практ. конф. – Пенза : ПДЗ, 2006. – С. 83–86.
  14. **Такташкин, Д. В.** Математическая модель поля скоростей воздушных потоков у поверхности вращающейся заготовки / Д. В. Такташкин // Проблемы исследования и проектирования машин : материалы Междунар. науч.-техн. конф. – Пенза : ПДЗ, 2007. – С. 12–15.
  15. **Ирисов, А. С.** Испаряемость топлив для поршневых двигателей и методы ее исследования / А. С. Ирисов. – М. : Изд-во нефтяной и горно-топливной литературы, 1955. – 305 с.
  16. **Яворский, Б. М.** Справочник по физике / Б. М. Яворский. – М. : Наука, 1968. – 940 с.
  17. **Резников, А. Н.** Теплофизика резания / А. Н. Резников. – М. : Машиностроение, 1969. – 496 с.
  18. **Такташкин, Д. В.** Математическая модель расчета контактных температур и тепловых потоков в зоне резания при лезвийной обработке / Д. В. Такташкин, А. Г. Елистратова // Проблемы информатики в образовании, управлении, экономике и технике : материалы 7-й Всерос. науч.-техн. конф. – Пенза : ПДЗ, 2007. – С. 154–158.