

MURZIN L., KOLOSOVSKY Y., ZABLOVSKY A., SMIRNOV A. Effects warmly and form-creature of opening at boring of laminates

*The results of research of effects of change of temperature are in-process represented in the process of wimbling in the packages of experimental models compositions, consisting of plates of organic glass and steel. At wimbling registered kinetics of change of temperature by a videosurvey, that allowed to confront thermal effects with the effects of formcreature of openings.*

**Keywords:** formcreature of openings, stratified composition, planning of experiment, videosurvey

УДК 621.375.826:001.57:551.482.32

**В. П. Лихошва, Е. А. Рейнталь, Ф. И. Кирчу\*, А. П. Шатрава,  
Л. А. Бондарь, А. Н. Тимошенко**

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

\*Национальный авиационный университет, Киев

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ГАЗОЛАЗЕРНЫХ ПОТОКОВ ПРИ СОЗДАНИИ ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ НАГРЕВАНИЯ ДИСПЕРСНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

*На основе численного моделирования различных способов подачи порошковых материалов в газо-лазерном потоке проведена разработка конструкций подающих устройств (фурм), исследованы их эксплуатационные характеристики.*

**Ключевые слова:** нагрев дисперсных частиц, численное моделирование, газолазерный поток

При создании новых технологий лазерного легирования, наплавки, напыления, получения композиционных и наноматериалов, где одним из этапов является нагрев порошковых материалов, необходимо согласовать и совместно решить ряд следующих задач: формирование газового потока, несущего дисперсные частицы, соответствующего апертуре лазерного луча; оптимальное распределение частиц по сечению потока; управление траекторией и скоростью их движения; равномерности нагрева каждой частицы и всего объема частиц в целом и других. Решение поставленных задач должно укладываться в процесс проектирования новых устройств и определять их конфигурацию и технологические возможности.

Настоящая работа посвящена разработке и исследованию эксплуатационных характеристик устройств (фурм), предназначенных для подачи и контролируемого нагрева порошковых материалов под воздействием лазерного излучения в соответствии с техническими требованиями.

В начале процесса проектирования и определения основных параметров будущего устройства использовали расчетные методы, в которых используются аналитические и эмпирические соотношения [1]. Их сравнительно простое применение позволяет за короткое время провести разработку нескольких вариантов геометрии проточной части, а затем в первом приближении выбрать необходимую конфигурацию. Однако полученные таким способом геометрические параметры и характеристики устройства являются приближен-

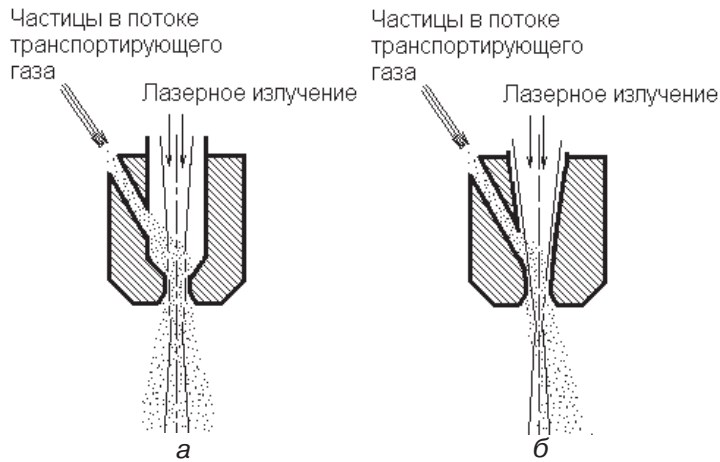
ными и нуждаются в уточнении и оптимизации. Это становится возможным при использовании современных методов численной газодинамики [2] и экспериментальных методов исследования газового течения. Применение численного эксперимента для изучения сложных газодинамических процессов в проточных частях различных устройств открывает возможности более глубокого понимания физических явлений, установления новых закономерностей и разработки полезных рекомендаций для решения важных технических задач. Оба метода дополняют друг друга и поэтому не следует противопоставлять компьютерное моделирование экспериментальным исследованием.

Для численного моделирования использовали два варианта фурм, схемы которых представлены на рис. 1. Схемы отражают основные тенденции подачи порошка в газовом потоке: соосно (рис. 1, а) и с пересечением лазерного излучения (рис 1, б).

В настоящей работе вычисления проводили на основе методов численной гидрогазодинамики (CFD-computation fluid dynamics). Решение поставленной задачи находили при использовании упрощенных уравнений Навье-Стокса путем привлечения некоторых гипотез и эмпирических зависимостей [2, 3], основанных на их осреднении по Фавру-Рейнольдсу, и применении моделей турбулентной вязкости для их замыкания.

Процесс проектирования условно разделен на следующие этапы:

- предпроцессорная подготовка (проектиро-



**Рис. 1.** Схемы подачи порошка под лазерное излучение: фурма № 1 (а); фурма № 2 (б)

вание геометрии объекта исследований, накладывание граничных условий, генерация расчетной сетки, задания критериев адаптации сетки (при использовании адаптации));

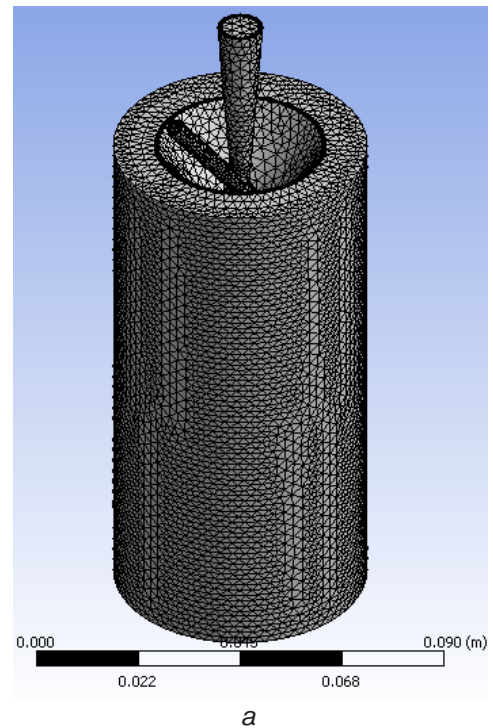
- проведение расчетов;
- послепроцессорная обработка результатов (визуализация результатов расчета, определение и сохранение числовых значений характеристик параметров течения и силового действия на элементы, которые находятся в потоке, и др.);
- применение методов оптимизации.

Трехмерная модель проточной части исследуемых фурм и структура сетки расчетной области представлены рис. 2. В процессе математического моделирования газодинамического течения в фурме использовалась неструктурированная тетраэдральная сетка, общее количество элементов которой составляло от 490 до 510 тыс. в зависимости от конфигурации фурмы. Выбор количества элементов для течений данного типа базировался на рекомендациях [4]. Для адекватного расчета течений в области пограничного слоя на твердых поверхностях (стенки проточных каналов) строился призматический пограничный слой толщиной 1 мм.

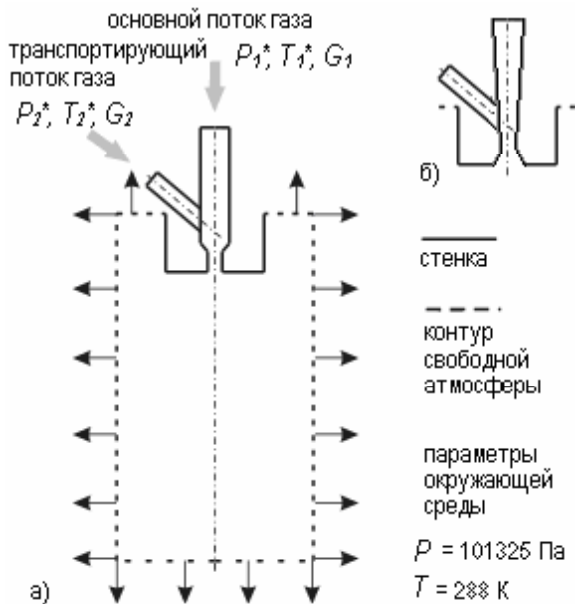
Граничные расчетные условия определяли на всех поверхностях расчетной области, включая условия на входе и на выходе, а также на твердых стенках рис. 3. На входе: полная температура потока ( $T^*=300$  K), расход газа через основной ( $G_1=0,00043$  кг/с) и дополнительный ( $G_2=0,000038$  кг/с) каналы, а на выходе моделировали, как истечение двухфазного потока в атмосферу с параметрами окружающей среды ( $T^*=288$  K;  $P = 101325$  Па). Твердые стенки рассматривались как адиабатические и непроницаемые с равенством нулю трех компонент скорости. В расчетах использовали модель турбулентной вязкости  $k-\omega$  Ментера со стандартным набором констант:  $\alpha_\infty^* = 1$ ;  $\alpha_\infty = 0,52$ ;  $\alpha_0 = 1/9$ ;  $\alpha_1 = 0,31$ ;  $\beta_\infty^* = 0,09$ ;  $\beta_{i1} = 0,075$ ;  $\beta_{i2} = 0,0828$ ;  $\sigma_{k1} = 1,176$ ;  $\sigma_{k2} = 1,0$ ;  $\sigma_{\omega1} = 2,0$ ;  $R_\beta = 8$ ;  $R_k = 6$ ;  $\zeta^* = 1,5$ ;  $M_{j0} = 0,25$  [5].

Результаты численного моделирования, представленные на рис. 4 и рис. 5, отображают распределение скоростей движения потоков газа и турбулентности кинетической энергии во внутренних каналах фурмы и на выходе из нее.

Если для фурмы № 1 характерны высокая скорость истечения газа на выходе из фурмы и равномерное распределение скоростей течения газа относительно оси, что наглядно видно по сечению потока (А-А) в фокусе лазерного луча вблизи торцевой поверхности (рис. 4, а), то для фурмы № 2 скорость истечения ниже, а аналогичная область радиального сечения – эллипсовидная (рис. 4, б). При этом, в первом случае площадь сечения потока и наблюдаемый градиент радиального распределения



**Рис. 2.** Трехмерная модель проточной части и структура сетки расчетной области: фурма № 1 (а), фурма № 2 (б)



**Рис. 3.** Схема структуры расчетной области с конструктивными особенностями фурмы № 1 (а) и № 2 (б)

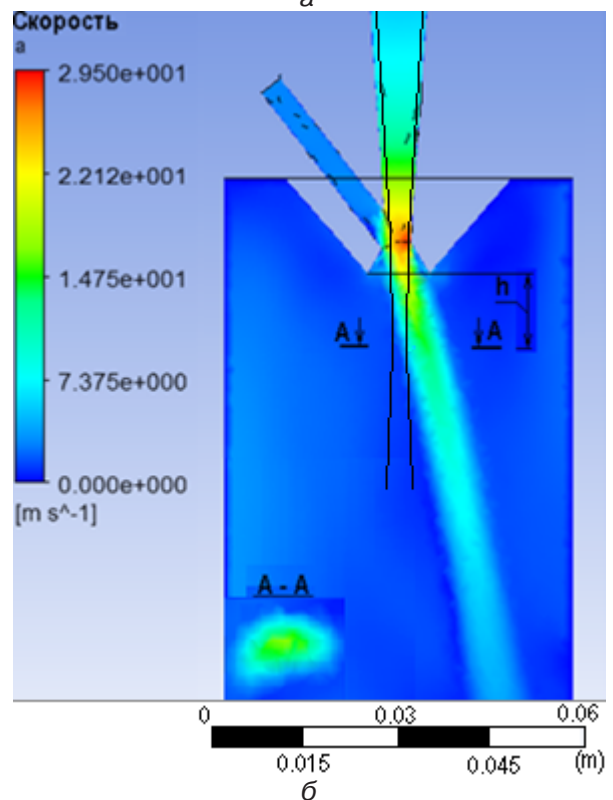
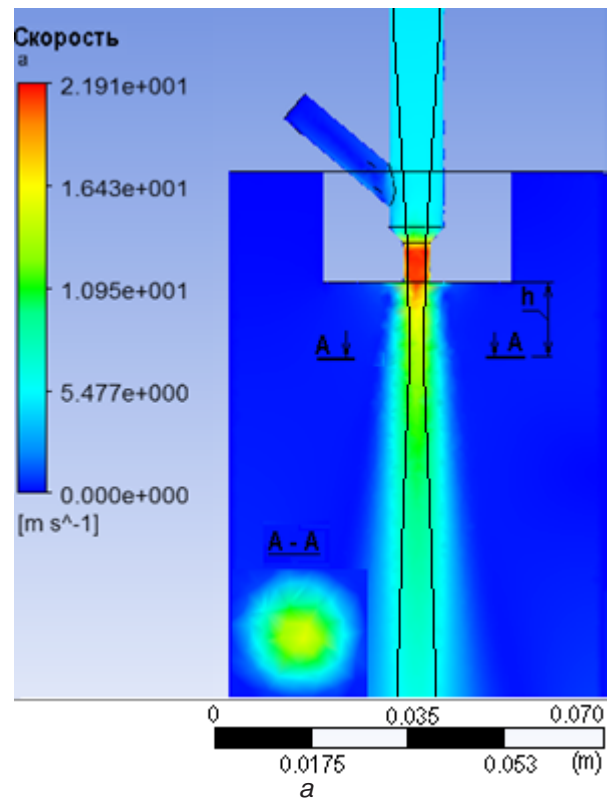
скоростей по сечению больше, чем во втором случае, где градиент скорости по сечению меньше, а поток более рассредоточен и более однороден.

Визуальные наблюдения области распределения сыпучих материалов в процессе экспериментальных исследований подтвердили результаты математического моделирования. Поток частиц на выходе из фурмы № 1 достаточно плотный, однако уже на расстоянии 15 мм от торца он расширяется, наблюдается рассеивание потока. С увеличением расстояния от торца фурмы рассеивание увеличивается, а плотность потока уменьшается. Причины рассеивания потока объясняются высокой турбулентностью кинетической энергии данного вида фурмы (рис. 5, а), которая возрастает с увеличением расстояния от торца до рассматриваемого сечения среза потока.

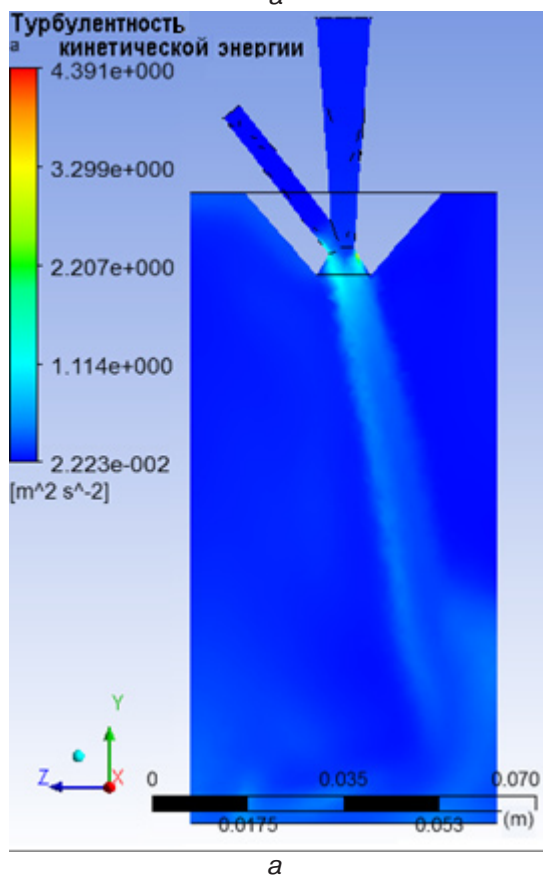
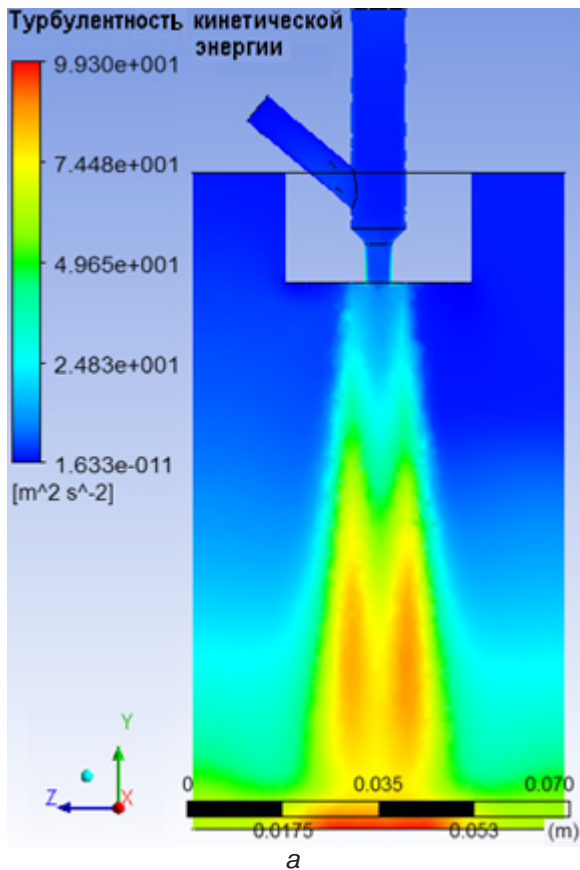
Плотность распределения частиц в потоке на выходе из фурмы № 2 с диффузором при увеличении расстояния от торца фурмы изменяется меньше, поток более однородный, однако при сравнении поперечных сечений потока в рабочей зоне, расположенных на одинаковых расстояниях от торца фурмы (например, сечение А-А), для фурмы № 2 характерна большая размытость периферии потока. Объяснение этому явлению находится в соответствии с изменениями турбулентности кинетической энергии потока (рис. 5, б).

При геометрическом наложении лазерного луча на двухфазный поток (рис. 4) видно, что в фурме № 1 нагрев основной массы частиц происходит в дофокальной области. В фокальную и зафокальную области нагрева попадают только те частицы, которые в полете незначительно отклоняются от оси. Достаточно большое количество частиц при вылете из фурмы за счет турбулентности кинетической энергии (рис. 5, а), приобретая горизонтальную составляющую движения, отклоняется от оси, рассеивая поток.

Проведение экспериментальных исследований по использованию фурмы № 1 для нагревания дисперсных неметаллических частиц выявили конструктивную особенность, оказывающую негативное влияние на процессы длительной работы устройства. Применение в конструкции внутренних каналов в виде цилиндров формирует зоны повышенной турбулентности, в которых происходит налипание на стенки канала легкоплавких частиц и способствует формированию зон застоя, снижению пропускной способно-



**Рис. 4.** Распределение скоростей движения газовых потоков во внутренних каналах фурм и рабочей зоне, а также в поперечном сечении на расстоянии  $h$  от торца, что соответствует положению фокуса линзы лазерного излучения: фурма № 1(а); фурма № 2 (б)



**Рис. 5.** Турбулентность кинетической энергии движения газовых потоков во внутренних каналах фурм и рабочей зоне: фурма № 1(а); фурма № 2 (б)

сти и еще большему возрастанию турбулентности кинетической энергии, и в результате дальнейшего ухудшению работы данного устройства.

Для фурмы № 2 практически весь поток пере-

секает область лазерного облучения, однако часть его пересекает в дофокальной, часть в фокальной и совсем небольшая в зафокальной области. Время пребывания каждой частицы в зоне облучения, определяемое местоположением в потоке и скоростью полета, отличается, а с учетом того, что плотность энергии облучения в дофокальной, фокальной и зафокальной областях также разная, условия нагрева различаются. Это определяет существенную неоднородность нагрева частиц в потоке, и с учетом наложения неоднородности фронта нагрева по сечению лазерного луча управление нагревом каждой частицы еще более усложняется.

Тем не менее, наложение неоднородностей фронта распределения скоростей в газовом потоке и фронта распределения энергии лазерного излучения может иметь и определенный положительный эффект. Он обусловлен тем, что нагрев частиц, находящихся на периферии двухфазного потока и обладающих меньшей скоростью, попадая в область с меньшей плотностью лазерной энергии, незначительно отличается от нагрева частиц, летящих с более высокой скоростью, но попадающих в область с более высокой плотностью энергии. Эту особенность можно наблюдать при нагреве частиц лазерным излучением с гауссовым распределением интенсивности ( $\text{CO}_2$  – лазер) при использовании фурмы № 2. Для реализации данного эффекта важно правильно определить положение фокуса лазерного излучения.

Таким образом, на условия нагревания частиц в фурме оказывают влияние следующие параметры: конструктивные особенности фурмы, газодинамические параметры движения двухфазного потока, его плотность и распределение частиц в потоке, оптические и энергетические параметры лазерного излучения, расстояние до мишени.

Для повышения эффективности работы фурмы № 1 необходимо провести некоторые конструктивные доработки, связанные с изменением внутренних каналов, формирующих двухфазный поток и обеспечивающих снижение турбулентности кинетической энергии, обеспечить размеры двухфазного потока в соответствии с апертурой лазерного излучения. Отличительной особенностью данной конструкции является и то, что величина расстояния до мишени при соблюдении вышеуказанных требований, может быть дополнительным фактором управления процессом нагревания дисперсных материалов для слабозапыленных потоков и газозвесей.

Конструкция фурмы № 2, отличающаяся значительно меньшей турбулентностью кинетической энергии как во внутренних каналах, так и на выходе из нее, тем не менее также имеет определенные недостатки, связанные с неравномерностью нагрева всего потока частиц, ограниченной управляемостью процессом нагрева и предрасположена для использования на одном определенном расстоянии до мишени.



#### ЛИТЕРАТУРА

1. Абрамович Г. Н. Прикладная газовая динамика. – М.: Наука, 1991. – 600 с.
2. Роуч П. Вычислительная гидродинамика. – М.: Мир, 1980. – 616 с.
3. Вычислительная гидромеханика и теплообмен / Д. Андерсон, Дж. Таннехилл, Р. Плетчер. – М.: Мир, 1990. – 725 с.
4. Fluent 6.2 User's Guide. – Fluent Inc., 2003. – 1823 p.
5. Fluent 6.2 User's Guide. Chapter 11: Modeling Turbulence. – Fluent Inc., 2003. – 80 p.

ЛИХОШВА В. П., РЕЙНТАЛЬ О. О., КИРЧУ Ф. І., ШАТРАВА О. П., БОНДАР Л. А., ТИМОШЕНКО А. М. Моделювання газолазерних потоків при створенні устаткування для нагрівання дисперсних матеріалів

*Проведено чисельне моделювання різних способів подачі порошку в газолазерному потоці з метою розробки конструкції пристрою подачі порошкових матеріалів, досліджено експлуатаційні характеристики фурм.*

**Ключові слова:** нагрів дисперсних частинок, чисельне моделювання, газолазерний потік

LIKHOSHVA V., REYNTAL E., KIRCHU F., SHATRAVA A., BONDAR L., TIMOSHENKO A. Modelling of gas - laser streams at creation of the equipment for heating of disperse materials

*With the purpose of development of device construction of powder-like materials serve numerical modelling of various ways of powder giving in gas - laser stream is spent, tuvers operational characteristics are investigated.*

**Keywords:** heating of disperse particles, numerical modelling, gas- laser stream

---

### ПРОФЕССОРУ СКРЕБЦОВУ АЛЕКСАНДРУ МИХАЙЛОВИЧУ – 85 лет



А. М. Скребцов – профессор, доктор технических наук приобрел в науке известность своими пионерскими исследованиями металлургических процессов с помощью метода радиоактивных изотопов на металлургическом комбинате «Азовсталь».

Алексей Михайлович Скребцов родился 2 декабря 1924 г. в Белгородской области (Россия). В 1953 г. окончил физико-химический факультет Московского института стали и сплавов и до 1965 г. работал в центральной заводской лаборатории комбината «Азовсталь» на должностях инженера, старшего инженера, руководителя исследовательской группы. При инициативной поддержке сотрудников ЦНИИЧМ (г. Москва) и активном участии А. М. Скребцова в 50-е годы были проведены первые в мире работы по важнейшим малоизученным вопросам металлургии в доменном, сталеплавильном и прокатном производствах. Результаты этих работ демонстрировались на ВДНХ СССР, за что комбинат был награжден Дипломом

I степени, а Алексей Михайлович – Малой Золотой медалью.

В 1963 г. А. М. Скребцов защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук и опубликовал одну из первых своих монографий по использованию радиоактивных изотопов в металлургии. Она была издана в Лондоне в 1965 г. на английском языке, ссылки на эту монографию встречаются во многих периодических изданиях мира.

С 1965 г. Алексей Михайлович связал свою судьбу с Приазовским государственным техническим университетом (ПГТУ). В период 1965-1975 гг. он работал доцентом кафедры «Теория металлургических процессов», в 1973 г. защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук, в 1974 г. был утвержден ВАК в звании профессора кафедры «Теории металлургических процессов».

В период 1975-1990 гг. А. М. Скребцов заведовал в ПГТУ кафедрой литейного производства черных и цветных металлов. В этот период он приложил много сил для организации лаборатории литейного производства, ее оснащения современным оборудованием, а также организации учебного процесса и его методического обеспечения. За это же время он подготовил 8 кандидатов наук.

С 1990 г. и по настоящее время Алексей Михайлович работает профессором той же кафедры, его основные лекционные курсы - «Теоретические основы литейного производства» и «Затвердевание и свойства литейных сплавов». На кафедре большое внимание он уделил повышению эксплуатационной стойкости деталей сменного металлургического оборудования – изложниц и поддонов. В последнее время А. М. Скребцов активно разрабатывает теорию жидкого состояния металлического расплава с целью приложения ее к приоритетным направлениям современной металлургии - использование явле-