

**Е.А.Лавров**, д.т.н., профессор, Сумської державний університет  
**Н.Л.Барченко**, асистент Сумської НАУ

## ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ОПЕРАТОРА ДЛЯ СИСТЕМ ЭРГОНОМИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ОБУЧАЮЩИХ СРЕД

*Целью данной работы является обзор методов измерения параметров обучаемого, влияющих на выбор формы представления материала. Для измерения психофизиологических характеристик применяются тестирующие методики и специальные аппаратные системы. В статье рассмотрены существующие подходы и сделан вывод о перспективности применения опроса о предпочтениях и наблюдение за клавиатурным подчерком.*

**Постановка проблемы в общем виде.** Повышение эффективности информационных технологий обучения связано с развитием и применением методов и средств построения информационно-образовательных систем на основе адаптивных алгоритмов управления обучением и контроля уровня подготовки [1]. Подобные алгоритмы используют принцип обратной связи и их возможности определяются составом параметров, доступных для измерения во время обучения и контроля. Традиционно обратная связь строится по результатам анализа ответов обучающегося и не учитывает его психофизическое состояние в реальном масштабе времени.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Влияние психофизиологических характеристик (ПФХ) и функционального состояния обучаемого на качество взаимодействия в системе «человек-компьютер» рассмотрено во многих работах [1,3,6]. В работе [2] была разработана нейросетевая модель описания деятельности обучаемого. Для обеспечения НС модели исходными данными необходима информация о состоянии обучаемого, в том числе и о его предпочтениях, и о текущем функциональном состоянии [11]. На рисунке 1 представлены возможные пути получения исходных данных для информационной модели выбора формы представления учебного материала.

Определить предпочитаемую обучаемым форму представления материала (например, текст, графика, насыщенность мультимедиа) возможно следующими способами:

- через систему оценки ПФХ [1]. На основании оценки ПФХ обучаемого экспертная система определяет предпочитаемую форму представления учебного материала;
- через специально спланированный эксперимент, который состоит в предъявлении фраг-

ментов учебного материала с разными параметрами и фиксации результатов обучения;

- через опрос обучаемого о его предпочтениях. Обучаемому предлагается определить степень желательности того или иного параметра по специальной шкале. На основе специальных алгоритмов формируется решение о предпочитаемой форме представления материала.

Функциональное состояние обучаемого необходимо контролировать в течение сеанса обучения.



Рисунок 1. Возможные пути получения исходных данных для информационной модели выбора формы представления учебного материала

**Формулирование целей статьи (постановка задачи).** Целью данной работы является анализ применимости методов измерения параметров обучаемого, влияющих на выбор формы представления материала.

Для реализации поставленной цели необходимо:

- Рассмотреть какие характеристики влияют на эффективность взаимодействия в системе «студент-компьютер»
- Рассмотреть существующие методы измерения характеристик оператора системы «студент-компьютер» и выбрать наиболее подхо-

дящие для данного исследования.

**Изложение основного материала исследования.** Гипотетически для каждого обучаемого существует свой оптимальный набор методических воздействий, способствующих наиболее эффективной познавательной деятельности. Важной задачей интеллектуальной обучающей системы является выявление различий в восприятии, формировании представлений и усвоении знаний учащимися, которые позволяют наиболее эффективно управлять процессом обучения [2]. Для осуществления этой задачи в модели обучаемого (МО) выделяют *психофизиологический компонент (ПФК)*.

#### Психофизиологический компонент МО.

В работе [4] для сферы профессионального образования выделены группы характеристик, которые оказывают влияние на эффективность процессов усвоения новой информации:

- связанные с физиологическим состоянием человека, меняющимися в течение сеанса обучения;
- отражающих относительно устойчивые возможности обучаемого воспринимать учебную информацию с помощью различных типов объектов;
- позволяющих оценить помехоустойчивость обучаемого, через особенности личности.

В соответствии с этим делением Тулова С.А. [1] в состав ПФК МО включает комплекс изменяющихся в течение сеанса характеристик – *работоспособность*, и комплексы устойчивых в течение сеанса характеристик – *восприятие информации, усидчивость*.

Базовый состав МПФС представлен в табл. 1.

Поскольку целью включения в состав обучающей системы МО является управление отдельным сеансом обучения, большое значение имеет своевременная оценка психофизиологического состояния обучаемого. Определение периодичности, с которой следует оценивать то или иное свойство студента, приводит к выделению множества устойчивых и множества изменяющихся характеристик. Очевидно, что поддержка МО в актуальном состоянии требует оценки изменяющихся характеристик несколько раз в течение сеанса, а устойчивых – в начале каждого сеанса.

Таблица 1.

Состав комплекса характеристик МПФС

Комплекс	Обозначение	Характеристика
К <sub>1</sub> (работоспособность)	K <sub>11</sub>	Уровень функциональной подвижности нервной системы (НС)
	K <sub>12</sub>	Выносливость НС
	K <sub>13</sub>	Способность к восприятию информации
	K <sub>14</sub>	Динамическое внимание
К <sub>2</sub> (восприятие информации)	K <sub>21</sub>	Способность к пространственным операциям
	K <sub>22</sub>	Преобладающий тип модальности
	K <sub>23</sub>	Тип высшей нервной деятельности
	K <sub>24</sub>	Способность к логическому мышлению
	K <sub>25</sub>	Темперамент
	K <sub>26</sub>	Способность к восприятию графической информации
	K <sub>27</sub>	Способность к восприятию текстовой информации
К <sub>3</sub> (усидчив)	K <sub>31</sub>	Нейротизм
	K <sub>32</sub>	Тип НС
	K <sub>33</sub>	Утомляемость

#### Методы измерения психофизиологических характеристик оператора.

Особый интерес представляет определение текущего психоэмоционального состояния обучаемого. В качестве реальных инструментов, определяющих психофизиологическое состояние, можно выделить две большие группы:

- *тесты и тестирующие программы;*
- *специальные аппараты или системы.*

В психофизиологии накоплен достаточно богатый опыт изучения и разработаны различные методы и методики конкретного диагностирования или выявления интеллектуально-психофизиологических состояний человека. Каждая из методик реализует определенный исследовательский методологический принцип психодиагностики, имеет свой алгоритм получения результата и, следовательно, может быть воплощена в компьютерную технологию оперативного диагностирования субъекта [5].

**Тесты и тестирующие программы.** Анализ литературы показывает, что для оценки большинства характеристик можно подобрать несколько альтернативных тестовых методик. Сформулированы требования для выбора методик: доступность понимания, формализованность и минимальное время прохождения теста.

В работе [1] предлагаются следующие методики, которые наиболее полно удовлетворяют перечисленным критериям (табл.2).

Приведенные в табл.2 методики в силу своей

оперативности позволяют быстро наполнять МО в начале работы студента в обучающей системе и поддерживать МО достоверной на протяжении сеанса обучения.

Оценка функционального состояния человека-оператора преимущественно связана с исследованием утомления и динамики работоспособности. Работоспособность в эргономике – состояние физиологических и психических функций человека-оператора, характеризующее его способность выполнять определенную деятельность с заданной эффективностью,

требуемым качеством и в течение требуемого времени.

На работоспособность значительно влияют различные индивидуальные физиологические и психологические качества, особенно в ситуациях, вызывающих психологический стресс. Основу работоспособности составляют специальные знания, умения, навыки, определенные психические, физиологические и физические особенности. Существует две методики тестовой оценки утомления: метод опросников и метод шкалирования.

Таблица 2.

Тестовые методики

Название тестов	Характеристика	Время выполнения
Компасы [6]	$K_{21}$	5 минут
Методика выявления соотношения сигнальных систем Е.А.Климова [6]	$K_{23}, K_{26}, K_{27}, K_{13}$	3 минуты
Тест-опросник Г.Айзенка для диагностики свойств и типа темперамента [7]	$K_{25}, K_{31}$	10 минут
Сложная сенсомоторная реакция выбора [6]	$K_{11}, K_{12}, K_{32}$	1,5 минуты
Таблицы Шульце [7]	$K_{14}$	3 минуты
Теппинг-тест [6]	$K_{33}$	30 секунд
Тест Дж. Равена «Шкала прогрессивных матриц» [8]	$K_{24}$	15 минут
Модальность [3]	$K_{22}$	2 минуты

**Метод опросников.** Использование этого метода направлено на выявление качественно разнообразных симптомов утомления, которые могут быть осознаны человеком. По содержанию опросники различаются между собой объемом перечисленных признаков (от нескольких вопросов до нескольких сотен) и способом их группировки. В целях краткости и простоты обработки результатов в опросники включают наиболее важные ключевые признаки утомления.

Недостатками этого метода являются:

- отсутствие способов количественной оценки полученных результатов (общее число симптомов – слишком грубый показатель, в котором не учитывается значимость того или иного признака утомления);
- не определяется степень выраженности того или иного признака утомления.

**Метод шкалирования.** В этом методе испытуемый соотносит свое состояние с рядом признаков, заранее ему предложенных, для каждого из которых выделены полярные оценки. Уровень выраженности конкретного признака определяется по специальной шкале. В последнее время при конструировании шкал исходят из представления о существовании сложного комплекса, характеризующегося четко выраженными группами признаков, сила проявления которых

меняется в зависимости от утомления.

**Специальные аппараты или системы.** Известно, что развитие усталости и других состояний, негативно сказывающихся на качестве принимаемых студентом решений, приводит к общему сдвигу психофизиологического состояния (ПФС). Это отражается на всех его биологических функциях (на работе кожных желез, торможении моторных функций, изменении поведенческих особенностей и т.д.).

Среди специальных аппаратно-программных систем оценки ПФС известны следующие методики:

- определение электрокожного сопротивления [9];
- анализ параметров ритма сердца [9];
- видеокomпьютерная система [9];
- анализ клавиатурного почерка [10].

**Определение электрокожного сопротивления.** Многие исследователи отмечают, что слежение за эмоциональным напряжением позволяет при определенных условиях предсказывать возможное ухудшение работоспособности человека до того, как это произошло. При этом в качестве информативного показателя изменения ПФС человека-оператора используются электрокожное сопротивление (ЭКС).

Данная методика основана на таком известном факте, как изменение ЭКС человека в сос-

тоянии релаксации и активации психомоторных функций. Доказано, что в норме электрокожное сопротивление человека в состоянии релаксации растет, а в состоянии активации уменьшается.



Рисунок 2. Схема измерения ЭКС

Однако проблема количественного оценивания ПФС затруднена рядом технических сложностей.

В соответствии с методикой, предложенной Ф.Я.Верховскими модернизированной О.В.Жбанковым, специалистами Московского государственного технического университета им. Н.Э.Баумана был разработан аппаратно-программный комплекс «Visual SGR», который позволяет объективно определять психофизическое состояние человека на основе относительного изменения электрокожного сопротивления.

Согласно теории генеза кожно-гальванической реакции секреторная деятельность потовых желез тесно связана с активностью нервной системы человека. Активация психомоторных функций вызывает обильное выделение пота, и сопротивление кожи падает. При обратном течении процесса пот поглощается, и сопротивление кожи растет. Причем первое состояние ЦНС принято называть концентрацией, а второе – релаксацией.

Изолируюсь от абсолютных значений ЭКС и принимая за физиологическую норму рост сопротивления в фазе релаксации и уменьшение сопротивления в фазе концентрации, можно строить объективную картину психофизического состояния человека. Тестирование проводят по специальной программе. После наложения электродов на два различных пальца одной из рук (обычно правой) и включения прибора проходит период установления переходных процессов и стабилизации показателя ЭКС (1 мин). Затем следуют периоды релаксации (5 мин) и активации (3 мин) с установкой для испытуемого на достижение состояний максимального расслабления или мобилизации

соответственно.

Градация значений ПФС в пяти уровнях выглядит следующим образом: «отлично», «хорошо», «удовлетворительно», «неудовлетворительно», «плохо». Использование такой дифференцированной оценки позволило разработать для каждого из теоретически возможных вариантов динамики ЭКС развернутые характеристики текущего состояния психофизической сферы и рекомендации по коррекции этого состояния.

**Анализ параметров ритма сердца.** Звеном, согласующим все адаптивные реакции на уровне органов, является система кровообращения. Обладая совершенным аппаратом управления и саморегуляции, эта система чутко реагирует на малейшие изменения потребностей органов, обеспечивая их адекватным кровоснабжением и одновременно согласуя этот регионарный запрос с гемодинамическими требованиями по жизнеобеспечению разнообразной деятельности целостного организма.

В настоящее время одним из наиболее информативных методов изучения функционального состояния организма является метод вариационной пульсометрии – анализа сердечного ритма. Метод основан на установлении закона распределения кардиоинтервалов как случайных величин.

Сердце как компонент мультипараметрического взаимодействия реагирует на любые изменения гомеостаза, а его физиологические показатели могут объективно отражать состояние организма.

Методика анализа сердечного ритма заключается в том, чтобы на основании изучения активности синусового узла по последовательности кардиоинтервалов, по вариациям их длительности сделать вывод о состоянии системы управления сердечным ритмом, как в целом, так и по отдельным ее уровням. При этом синусовый узел рассматривается не только в аспекте автоматизма сердечной деятельности, но и как индикатор деятельности всего организма.

Сущность вариационной пульсометрии заключается в получении закона распределения кардиоинтервалов как случайных величин. Для этого строится кривая распределения – гистограмма.

На рис. 3 представлена гистограмма распределения кардиоинтервалов с обозначенными на

ней основными параметрами вариационной пульсометрии:  $M_0$  – мода,  $AM_0$  – амплитуда

моды,  $MxDMn$  – вариационный размах (Difference between Maximal and Minimal value).

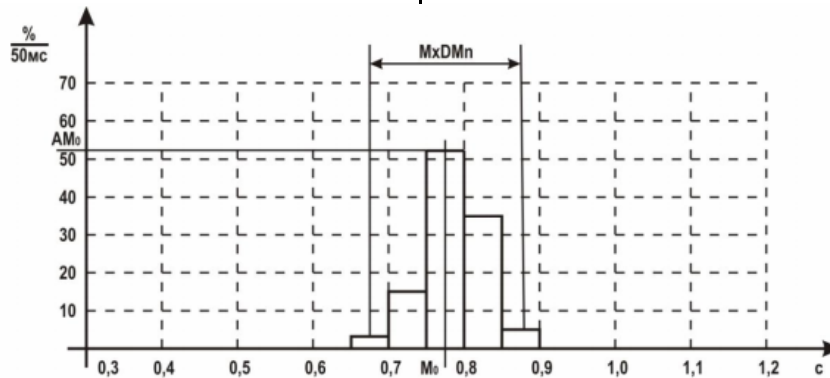


Рисунок 3. Гистограмма распределения кардиоинтервалов

Мода ( $M_0$ ) – наиболее часто встречающееся в данном динамическом ряде значение кардиоинтервала. В физиологическом смысле, это наиболее вероятный уровень функционирования сердечно-сосудистой системы. При нормальном распределении и высокой стационарности исследуемого процесса  $M_0$  мало отличается от математического ожидания.

Методы анализа вариабельности сердечного ритма могут использоваться для оценки состояния человека в различных условиях трудовой деятельности, физической нагрузки, уровня стресса и т.д.

**Видеокomпьютерная система.** В психофизиологии наибольший интерес представляют три категории глазных реакций: сужение и расширение зрачка, мигание и глазные движения. Основной принцип работы системы определения функционального состояния, основанной на анализе морганий, – построение графиков движения век, а также изменения направления взгляда и их последующий анализ. Как показывают многочисленные исследования, характер движения век и характер перевода взгляда на другой объект существенно зависят от текущего функционального состояния человека. Этот факт и позволяет использовать информацию о морганиях для диагностики функционального состояния обучаемого. Кроме этого, система может дополнительно анализировать информацию, получаемую от различных органов управления.

Технология Vibralmage относится к области биометрии и может быть использована для преобразования, получения, обработки и анализа электронных изображений живых биологических объектов, совершающих периоди-

ческие колебательные перемещения различной частоты и амплитуды. Полученное при обработке изображение, может быть использовано для получения информации о физиологическом или психофизиологическом состоянии человека.

Ввод изображения объекта осуществляется с любого источника видео, например, цифровой телевизионной камеры, а программное обеспечение обрабатывает полученную информацию и предоставляет интерфейс для сохранения полученных результатов.

Система позволяет визуально оценивать интегральное психофизиологическое состояние человека с помощью ауры, которая программно строится на основании полученного виброизображения.

**Анализ клавиатурного почерка.** В исследованиях по биометрии ряда ученых (А. И. Иванов, В. Ф. Гузик, А. И. Суздальцева) показано, что каждый человек имеет свой клавиатурный почерк, являющийся проявлением работы вегетативной нервной системы (подсознательными движениями человека), его изменение отражает развитие торможения моторных функций человека. Использование клавиатурного почерка для определения психофизиологического состояния по изменению торможения моторных функций позволяет определять не только динамику состояния человека, но дает возможность избавиться от применения дополнительных специализированных устройств, что значительно снижает затраты на разработку и внедрение таких систем.

Для математической обработки данных, полученных в результате экспериментов с биологическими объектами, используется аппарат искусственных нейронных сетей. Параметрами

для анализа клавиатурного почерка являются следующие:

- скорость (или частота) ввода символов. Для обработки берутся временные интервалы, затраченные на ввод отдельных букв.

При накоплении достаточного для расчета количества статистических испытаний получается множество временных интервалов, потраченных на ввод каждого символа. На основе полученных значений рассчитывается среднее время ввода отдельно взятого символа (математическое ожидание и отклонение от среднего (дисперсия)). Эта матрица значений символ/математическое ожидание/дисперсия можно принять как эталон для конкретного пользователя;

- разность между соседними временными интервалами, длящимися между отдельными нажатиями. По разностям находится дополнительная дифференциальная характеристика, производная по времени, показывающая изменение скорости набора. Она также индивидуальна.

Смешанная модель учитывает как дифференциальную характеристику, так и рассматривает предысторию.

При использовании выбранного метода точками измерения состояния обучаемого являются интервалы нажатий на клавиши и время удержания между нажатиями. Для измерений выбирается определенная последовательность, которую обучаемому необходимо периодически набирать. Максимальная работоспособность приравнивается к наилучшему состоянию оператора, это состояние является эталоном и оценивается в сто процентов работоспособности.

Минимальная работоспособность оценивается в ноль процентов. На основании полученной информации происходит определение психофизического состояния обучаемого и в дальнейшем формирование управляющего воздействия.

Динамика изменения моторных функций обучаемого определяется по отклонению от эталонного значения, характеризующего его наилучшее психофизическое состояние. По степени отклонения текущего состояния обучаемого принимается решение о целесообразности дальнейшего процесса обучения.

Использование стандартного средства ввода данных (клавиатуры) для определения психофизического состояния обучаемых делает данный метод наиболее предпочтительным. Информа-

ция о клавиатурном почерке может использоваться для идентификации пользователя, что также является актуальной задачей в задачах идентификации пользователей в обучающей системе.

**Определение уровня стресса.** Для контроля функционального состояния может использоваться методика определения уровня стресса в течение сеанса обучения [12]. Прибор-детектор эмоционального состояния BrainSensor v.1.0. позволяет регистрировать возбужденное состояние, повышенное волнение, стрессовое состояние. Работает бесконтактно при температуре окружающей среды от -30 до +50. Радиус действия прибора на открытых пространствах до 30 м. Представляет собой небольшое устройство размера карманного брелока, изготовленное в соответствии с ГОСТ 12646-67, содержащее 3-х компонентный светодиод, управляемый электронной схемой. Действие прибора основано на специальном низкочастотном шумовом эффекте с подавлением собственного шума, при этом применена цифровая микропроцессорная обработка сигнала, позволяющая отстраиваться от влияния промышленных помех и резких перепадов температуры окружающей среды.

Визуализация детектируемого состояния осуществляется с помощью многоцветного (RGB) светодиода, меняющего свой цвет в процессе работы прибора. Если палитра свечения светодиода находится в пределах от зеленого до желтого, это означает спокойное и благоприятное состояние, т.е. «внешне ничего не происходит». В пределах нормы также считается свечение оранжевым или кратковременно оранжево-красным. Если свечение красным продолжается более 3 сек или красный (оранжево-красный) загорается 3 раза подряд за короткое время, это означает, что велика вероятность того, что поблизости от прибора находится человек с измененным психическим состоянием сознания.

**Выводы.** На успешность обучения влияют множество параметров. Для измерения психофизиологических характеристик применяются тестирующие методики. Главным недостатком подобного подхода является необходимость проведения тестирования перед сеансом и во время сеанса обучения, что не всегда положительно сказывается на учебно-познавательной деятельности.

Одним из способов уйти от данной проблемы

для определения статических характеристик видится в изучении предпочтений студентов относительно формы и способов представления учебного материала. Для динамических характеристик наиболее перспективны методы, которые можно использовать в условиях аудиторной работы и без применения электродов или другой специальной техники.

Наиболее естественным устройством ввода информации оператора является клавиатура.

Использование клавиатурного почерка позволяет оперативно отслеживать состояние обучаемого, что значительно снижает затраты на разработку и внедрение таких систем в интеллектуальную компьютерную обучающую систему.

В дальнейших исследованиях необходимо создать многофакторную модель, способную прогнозировать деятельность студента в обучающей системе.

### **Литература**

1. Тулова С. А. Структура Модели Обучаемого в Автоматизированной Обучающей Системе //Компьютерные технологии в управлении, диагностике и образовании (КТУДО-2002) //Сборник трудов международной научно-технической конференции. – Тверь, Тверской Государственный Технический Университет. – 2002. С. 72-75.
2. Lavrov E., Barchenko N., Pasko N. Conception of Neural-Functional networks for Human-Machine Interaction modeling// Materials International Scientific Conference "UNITECH '07" is organized by the Technical University of Gabrovo under the motto, 23-24 November 2007, Gabrovo, Bulgaria. - Gabrovo: University Publishing House "V.APRILOV", 2007. – Т. 3. - P.p 183-185
3. Филатова Н.Н., Архемчик О.Л. Разработка и исследование программно-методического комплекса для построения ПФК модели обучаемого // Educational Technology & Society 7(1) 2004. ISSN 1436-4522, pp. 182-197
4. Зайнутдинова Л.Х. Создание и применение электронных учебников: Монография. Астрахань: ЦНТЭП, 1999. – 364 с.
5. Кулагин Б. В. Основы профессиональной диагностики. – Л.: Медицина. Ленинградское отделение, 1984. – 216 с.
6. Е. Ильин. Дифференциальная психофизиология. – СПб.: Питер, 2001. – 464 с.
7. Практикум по общей экспериментальной и прикладной психологии. Под ред. Крылова А. А, Маничева С. А.— СПб.: Питер, 2003. – 560 с.
8. Блейхер В. М., Бурлачек Л. Ф. Психологическая диагностика интеллекта и личности. – Киев: Вища школа, 1978. С. – 142 с.
9. Юрков Н. К. Интеллектуальные компьютерные обучающие системы: моногр./ Н.К.Юрков – Пенза: Изд-во ПГУ, 2010. – 304 с.
10. Суздальцев А.И., Лобанова В.А., Абашин В.Г. Определение психофизиологического состояния оперативного персонала по клавиатурному почерку на нефтеперерабатывающих мини-заводах //Электронный журнал «Нефтегазовое дело», 2006.  
[http://www.oqbus.ru/authors/Suzdaltsev/Suzdaltsev\\_1.pdf](http://www.oqbus.ru/authors/Suzdaltsev/Suzdaltsev_1.pdf)
11. Буров А.Ю. Оценка функционального состояния операторов по показателям умственной работоспособности // Физиология человека -1986. -Т. 12. -№2. - С.281-288.
12. Прибор-детектор эмоционального состояния BrainSensor. <http://www.agpl.ru/project-bt/shop/21-brainsensor-1.html>

*Метою даної роботи є огляд методів вимірювання параметрів студента, що впливають на вибір форми подання матеріалу. Для вимірювання психофізіологічних характеристик застосовуються тестуючі методики і спеціальні апаратні системи. У статті розглянуті існуючі підходи і зроблений висновок про перспективність застосування опитування про переваги і спостереження*

*The purpose of this paper is to review the methods of measurement of the student, influence the choice of the presentation material. To measure the characteristics of applied psychophysiological testing techniques, and special hardware systems. The article deals with the existing approaches and concluded that the prospects of a survey on the preferences of a keyboard and monitor underscores.*

УДК 532. 526

А.М.Павлюченко, д.т.н., професор, Сумської НАУ

## ПРОФИЛИ СКОРОСТИ В СВЕРХЗВУКОВОМ ТУРБУЛЕНТНОМ ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ НА ПОРИСТОЙ ПЛАСТИНЕ ПРИ НАЛИЧИИ ВДУВА ВОЗДУХА И НЕИЗОТЕРМИЧНОСТИ, СОЗДАВАЕМОЙ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ТЕПЛООВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ CO<sub>2</sub>-ЛАЗЕРА НА ОБТЕКАЕМУЮ ПЛАСТИНУ

*Реализован метод формирования неизотермичности в турбулентном пограничном слое обтекаемой плоской поверхности в сверхзвуковой аэродинамической трубе с использованием теплового излучения CO<sub>2</sub>-лазера. Измерены профили скорости на пористой пластине при наличии вдува воздуха и неизотермичности. Применение излучения CO<sub>2</sub>-лазера в аэрофизическом эксперименте открывает возможности исследования тепловой защиты поверхности путем пористого вдува газов и на аблирующих поверхностях, исследования теплообмена конвекцией и излучением при вдуве через пористую поверхность оптически активных газов (CO<sub>2</sub>, SF<sub>6</sub> и др.).*

### 1. Постановка проблемы в общем виде.

Вопросы управления характеристиками сверхзвуковых турбулентных пограничных слоев, формирующихся в камерах сгорания и соплах ракетных двигателей, на лопатках газовых турбин и др., путем вдува воздуха и других газов через пористые поверхности являются актуальными для решения задачи их тепловой защиты и снижения сопротивления трения [1, 2, 3]. Особенно эффективным с этой точки зрения является вдув газов с малой молекулярной массой через пористую обтекаемую поверхность, как показали экспериментальные и теоретические исследования [1]. В реальных условиях пристеночные турбулентные пограничные слои являются неизотермическими, что обусловлено разностью температур между обтекаемой поверхностью и набегающим газовым потоком.

Таким образом, важной задачей является моделирование в сверхзвуковой аэродинамической трубе совместного воздействия на характеристики сверхзвуковых турбулентных пограничных слоев на пористой поверхности вдува воздуха через обтекаемую пористую пластину и неизотермичности. Одной из наиболее важных характеристик турбулентных пограничных слоев является профиль скорости по их высоте. При этом актуальным является вопрос о моделировании неизотермичности в

пограничном слое при наличии вдува воздуха через пористую поверхность в сверхзвуковой аэродинамической трубе.

### 2. Анализ последних исследований и публикаций.

К настоящему времени проведены фундаментальные теоретические и экспериментальные исследования влияния вдува газов через обтекаемые пористые поверхности на теплообмен и сопротивление трения в дозвуковых и сверхзвуковых турбулентных пограничных слоях [1, 4, 5] и показана эффективность этого метода тепловой защиты поверхности и снижения сопротивления трения. В [1] установлен эффект оттеснения турбулентного пограничного слоя на пористой поверхности, в результате чего коэффициент сопротивления трения резко уменьшился практически до нуля в сравнении со случаем отсутствия вдува газов. Для условий оттеснения турбулентного пограничного слоя при воздействии пористого вдува в [1] введено понятие критического параметра вдува газов

$$k_{кр} = \frac{(\rho_w v_w)_{кр}}{\rho_\infty v_\infty^{3/2}}$$

где  $\rho_w, v_w$  - соответственно плотность и скорость вдуваемого газа,

$\rho_\infty, v_\infty$  - соответственно плотность и скорость набегающего потока,