

оператора и повышая динамику процессов поворота. Полученные результаты можно использовать при написании алгоритмов управления для вычислительных блоков существующих и перспективных транспортных машин. Дальнейшим развитием данной работы может быть введение обратной связи ZVD-фильтра по другим параметрам G-сенсора движения – продольные и поперечные скорости и ускорения.

### Литература

1. Держанский В.Б., Тараторкин И.А., Карпов Е.К. Нечёткая логика в мехатронной системе управления движением быстроходной гусеничной машины // Безопасность транспортных средств в эксплуатации. – Сборник материалов 79-й Международной научно-технической конференции. – Нижний Новгород, 2012. – 349 с.
2. Держанский В.Б., Тараторкин И.А. Ограничение подвижности быстроходных гусеничных машин при флуктуации боковых сил // Тракторы и сельхозмашины, 2011, №6. - С. 14-18.
3. Derzhanskii V., Taratorkin I. Stabilization of Linear Motion of the Tracked Vehicle // SAE Technical Paper of the SAE 2013 Commercial Vehicle Engineering Congress. – 2013. – DOI: 10.4271/2013-01-2363. SCOPUS.
4. Держанский В.Б., Тараторкин И.А., Абдулов С.В. Управление переключением передач в трансмиссии с тремя степенями свободы // Тракторы и сельхозмашины, 2012, №7. - С. 22-26.
5. Карпов Е.К. Адаптивная система фильтрации задающих воздействий системы управления движением быстроходной гусеничной машины // Юбилейная XXV Международная инновационно-ориентированная конференция молодых учёных и студентов (МИКМУС – 2013): материалы конференции (Москва, 13-15 ноября 2013 г.). – М: Изд-во ИМАШ РАН, 2013. – С. 66.
6. Кузнецов А.П. и др. Shaping-алгоритмы подавления колебаний объектов управления // Доклады БГУИР, 2011, №7(61). - С. 5-11.
7. Держанский В.Б., Тараторкин И.А., Карпов Е.К. Гашение колебаний корпуса гусеничной машины в горизонтальной плоскости // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2013. № 11. <http://engbul.bmstu.ru/file/out/649862>
8. Lawrence J., Singhose W. Robustness of Input Shaping to Non-linear Crane Dynamics // Woodruff School of Mechanical Engineering Georgia Institute of Technology – Atlanta, Georgia 2008. – 30 с.

### **Эволюция аэродинамических характеристик автомобилей «КАМАЗ»**

к.т.н. Валеев Д.Х., к.т.н. Карабцев В.С.  
ОАО «КАМАЗ»  
8 (8552) 37-27-90, [pgk2@kamaz.org](mailto:pgk2@kamaz.org)

*Аннотация.* В статье отражены основные этапы работ, направленных на улучшение аэродинамических характеристик автомобилей КАМАЗ. Для каждого из этапов выделены применяемые методы исследований и сформулированы основные результаты. Показано, что применение современной вычислительной техники в сочетании с эффективным программным обеспечением позволяет выполнять оптимизацию аэродинамических характеристик грузовых автомобилей с меньшими материальными и временными ресурсами по сравнению с ранее применяемыми методами натурных испытаний и исследований масштабных моделей в аэродинамических трубах.

*Ключевые слова:* грузовой автомобиль, внешняя аэродинамика, аэродинамическое сопротивление, аэродинамические устройства, расход топлива.

Внешняя аэродинамика находится в тесной связи с внутренней и оказывает влияние на показатели и характеристики автомобиля в целом и его отдельные системы. Среди таких параметров и систем следует указать:

- топливная экономичность, особенно при сильном боковом ветре;
- загрязняемость, накопление пыли, грязи и снега в застойных зонах;
- уровни внешнего и внутреннего шума;
- система питания двигателя воздухом;
- системы вентиляции, отопления и поддержания микроклимата в кабине;
- система охлаждения двигателя;
- температурный режим тормозных механизмов, особенно в условиях горной местности и некоторые другие системы, от которых зависит производительность автомобиля, безопасность движения и комфорт водителя.

Грузовой автомобиль представляет собой трехмерную конфигурацию и относится к классу плохообтекаемых тел в отличие от самолета или его элементов. Если вопросами улучшения аэродинамических характеристик легковых автомобилей, спортивных (гоночных) и автобусов разработчики начали заниматься еще в 20-е ... 30-е годы прошлого века, то исследованиями аэродинамики грузовых автомобилей всерьез занимаются только с конца 60-х годов.

Следствием этого является:

- поверхностное изучение механизма образования аэродинамического сопротивления и его составляющих;
- недостаточное понимание физических процессов и явлений при возникновении отрывных и обратных течений, особенно при трехмерном отрыве;
- отсутствие систематических исследований характеристик внутренних течений в моторном отсеке, колесных нишах и в кабине.

В настоящее время существует множество методов исследования аэродинамических характеристик. Они подразделяются на качественные и количественные. Причем любой из них применим как к натурному образцу, так и к уменьшенной в определенном масштабе модели. Исследования могут выполняться в аэродинамической трубе или в процессе движения автомобиля в условиях естественной турбулентности приземного слоя атмосферы. В последние годы все большее применение в практике проектирования находят методы численных расчетов. Подробную информацию о применяемых методах и основных результатах исследований можно найти в работах [1] - [8].

### **Исследования трехмерных тел в аэродинамических трубах.**

В разное время были выполнены многочисленные исследования по оценке распределения давления и изучению структуры потока в аэродинамических трубах на простейших трехмерных геометрических телах – параллелепипедах. Рассмотрим некоторые результаты этих исследований с целью их практического применения в процессе разработки формы кабины перспективных автомобилей.

В статье [9] приведены результаты исследований по оценке влияния радиуса закругления передних кромок, ступенчатой формы и установки различных накладок в передней части прямоугольного параллелепипеда на его коэффициент аэродинамического сопротивления  $C_D$  и коэффициент распределения давления  $C_p$ .

В работе [10] представлены результаты исследований по влиянию размеров и расположения экранирующей пластины, устанавливаемой перед фронтальной гранью прямоугольного параллелепипеда на коэффициент его аэродинамического сопротивления  $C_x$  и распределение коэффициента давления  $C_p$ . Исследования выполнены в аэродинамической трубе Т-1К Казанского авиационного института (современный КНИТУ - КАИ). Следует отметить, что коэффициент аэродинамического сопротивления в работах зарубежных исследователей обозначается  $C_D$ , в работах отечественных -  $C_x$ .

Из данных, приведенных на рисунке 1 (*a* – без экранирующей пластины; *b* – с экранирующей пластиной) видно, что установка экрана в форме пластины перед параллелепипедом приводит к уменьшению величины  $C_x$  с 0,82 до 0,33 (в 2,48 раза) и существенному перераспределению давления по его поверхности. Фронтальная поверхность параллелепипеда, нахо-

длежащая без экрана в зоне избыточного давления, при наличии экрана, оказывается в зоне разрежения и сопротивление системы «экран + тело» резко снижается.

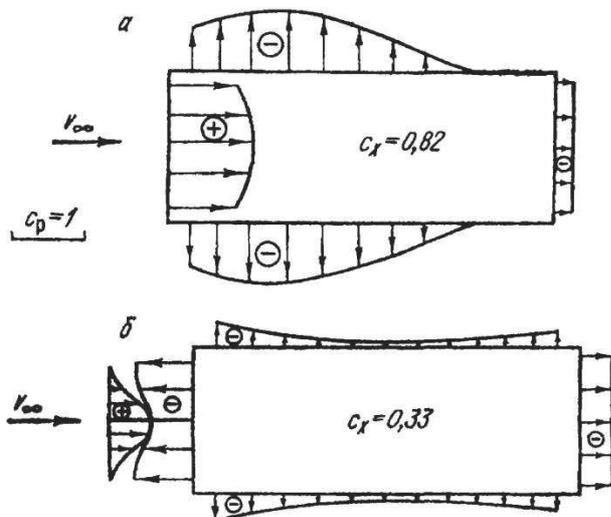


Рисунок 1.

На основе полученных данных можно сделать следующие выводы.

Минимум аэродинамического сопротивления ступенчатых трехмерных конфигураций реализуется при условии присоединения оторвавшегося с экранирующей пластины потока строго на переднюю грань параллелепипеда.

Установка перед параллелепипедом экранирующей пластины, при оптимальном соотношении площадей пластины и передней грани параллелепипеда и при оптимальном расстоянии между ними, позволяет уменьшить аэродинамическое сопротивление системы «экран + тело» в 2,5 раза.

### Изучение обтекания масштабных моделей.

На рисунке 2 приведены некоторые результаты исследований аэродинамических характеристик моделей масштаба 1:10 модернизированных автомобилей КАМАЗ-5425 в аэродинамической трубе Т-1К КНИТУ-КАИ. Показано, что применение обтекателей на крыше кабины позволяет уменьшить силу лобового сопротивления на 5...10%. Исследовано влияние внешних аэродинамических устройств на силу лобового сопротивления модели в зависимости от угла натекания потока. Из приведенных данных следует, что эффективность применения обтекателей при несимметричном натекании потока резко уменьшается. Поэтому при разработке подобных устройств должен учитываться и этот факт.

Использование же объемного обтекателя на передней стенке фургона, находящейся в зоне избыточного давления, позволяет уменьшить силу лобового сопротивления на 12,5...15,5%, в том числе и при несимметричном обтекании, что очень важно, поскольку в реальных условиях эксплуатации автомобиль практически всегда находится под воздействием естественных ветров и турбулентности воздушного бассейна.

В процессе развития конструкций кабин автомобилей КАМАЗ выполнен большой объем конструкторских работ и дорожных испытаний с целью снижения аэродинамического сопротивления и расхода топлива различных моделей автомобилей. Во всем комплексе исследований можно выделить пять основных этапов.

На первом этапе изучались аэродинамические характеристики автомобиля КАМАЗ-

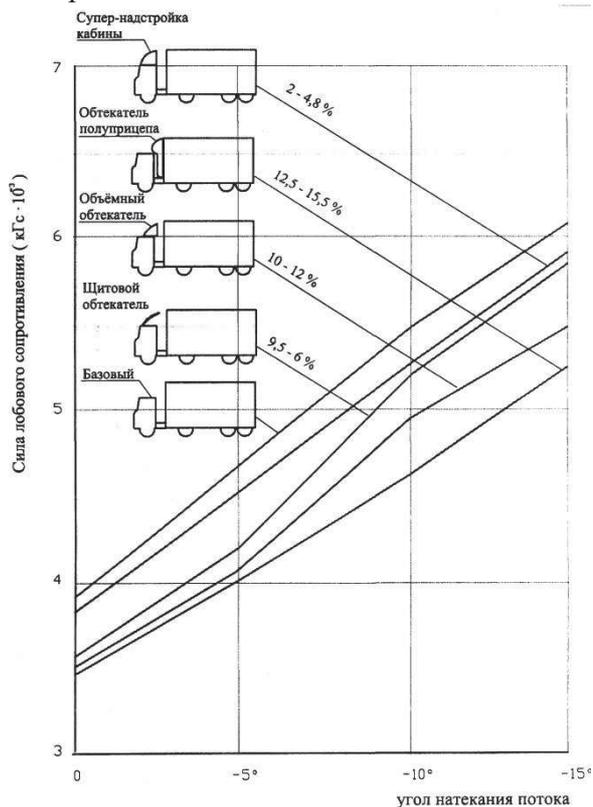


Рисунок 2.

5320 (с тентом и без него). Исследования выполнялись в основном в дорожных условиях – визуализацией потока с помощью дымовых струй (рисунок 3), регистрацией расхода топлива, величин пути выбега, максимальной скорости и распределения давления по поверхности автомобиля с помощью датчиков давления. Перечисленные параметры измерялись на автомобиле, оборудованном аэродинамическими устройствами и без них. Затем результаты испытаний сравнивались.



Рисунок 3.

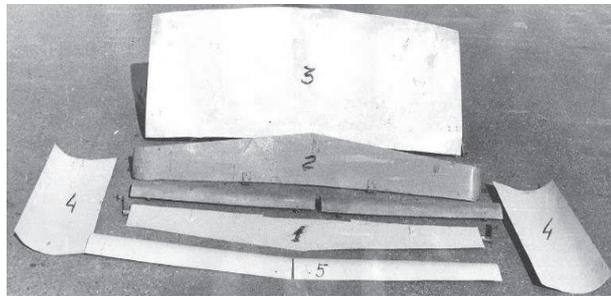


Рисунок 4.

Было установлено, что применение в конструкции автомобиля простых в изготовлении аэродинамических устройств (рисунок 4) в виде плоского щита (1 и 2), спойлера (не показан) и козырька (5), позволяет улучшить топливную экономичность указанного автомобиля на 3,2...3,4% в режиме движения с постоянной скоростью в интервале от 50 до 80 км/ч.

Также была отмечена необходимость направления оторвавшейся с верхней фронтальной кромки кабины струи строго на верхнюю кромку тента платформы при использовании различных обтекателей в качестве средства снижения аэродинамического сопротивления. Исследованиями установлено, что величина скорости обратного течения в зоне колесных ниш и дверей кабины модели автомобиля КАМАЗ-5320 достигает 1/3 от скорости набегающего потока.



Рисунок 5.

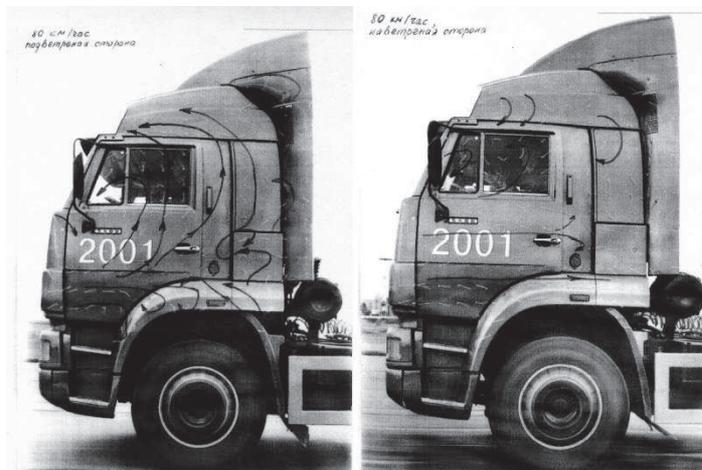


Рисунок 6.

Второй этап посвящен исследованию аэродинамических характеристик модернизированных автомобилей КАМАЗ-53205 и КАМАЗ-53215 в дорожных условиях. Фрагмент визуализации потока на боковой поверхности кабины представлен на рисунке 5. В результате выполненных испытаний установлено отрицательное влияние аэродинамического (противосолнечного) козырька на расход топлива – он возрастает на 1,0...3,0% при его установке на автомобиль с тентом. Кроме этого, сделан вывод о недостаточной эффективности щитков, частично перекрывающих колесные ниши, накладки стойки ветрового стекла и высоких боковых обтекателей по уменьшению зоны забрызгиваемости.

Исследованиями доказано, что для автомобилей, габаритная высота которых превышает 3.9 метра, для ощутимого в эксплуатации уменьшения расхода топлива целесообразна установка объемных и щитовых обтекателей больших размеров.

В целом выполненные исследования показали, что эффективность испытанных кон-

струкций аэродинамических устройств с точки зрения их практического применения в конструкциях автомобилей недостаточна.

В процессе реализации третьего этапа выполнялись экспериментальные исследования автомобилей и автопоездов с кабинами, разработанными по дизайн-проекту совместно с фирмой «DAF». Внедрение мероприятий, предложенных фирмой, обеспечило уменьшение суммарной силы аэродинамического сопротивления на 5...7%, однако проблемы переноса частиц пыли и грязи вдоль боковых и задней поверхностей кабины воздушным потоком, направленным снизу вверх, остались.

Результаты испытаний с использованием метода визуализации потока у боковой поверхности кабины, оборудованной аэродинамическим козырьком, верхним объемным обтекателем и боковыми обтекателями при скорости движения 80 км/час и наличии бокового ветра представлены на рисунке 6 (слева – подветренная сторона, справа – наветренная). Скорость ветра составляла 6... 10 км/час. На этом рисунке выделенными линиями со стрелками показано направление движения воздушных потоков (так называемые линии тока) в исследуемых зонах.

Анализ представленной информации позволяет сделать следующие выводы:

- на подветренной стороне боковой поверхности кабины существует мощный восходящий поток, который способствует переносу частиц грязи от колесной ниши вверх до уровня воздухозаборника;
- на подветренной стороне в зоне передних крыльев и колесной ниши существует обратное течение, так как линии тока в этой зоне разворачиваются на 180°;
- на наветренной стороне кабины поток прижат к поверхности кабины боковой составляющей скорости ветра, поэтому ярко выраженного восходящего потока не отмечается. Это утверждение касается только течения в пограничном слое, толщина которого определяется диаметром шелковинок;
- во всех случаях отмечается наличие отрывной зоны (за стойкой и накладкой стойки лобового стекла), которая простирается вниз по направлению набегающего потока вплоть до опускающего окна кабины.

На четвертом этапе проводились испытания автомобилей, оборудованных рестайлинговыми кабинами. Методы испытаний – те же, что и на предыдущих этапах. Фрагмент качественной картины течения у поверхности кабины приведен на рисунке 7.



Рисунок 7.

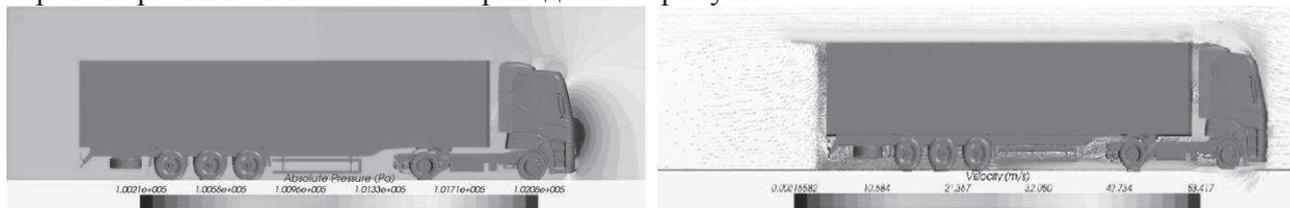


Рисунок 8.

В последние годы в связи с развитием средств вычислительной техники, инструментов для компьютерного проектирования и инженерного анализа все большее применение находят численные методы исследований аэродинамических характеристик. Эти методы исследований и лежат в основе пятого этапа. Краткий алгоритм выполнения расчетов включает следующие виды работ:

- подготовка упрощенной 3D-модели в среде UnigraphicsNX;
- создание домена для расчета аэродинамики;
- импорт геометрии в расчетный комплекс STAR-CCM+;
- построение объемной сетки для расчета;
- задание начальных условий задачи, физических моделей и параметров решателя;
- выполнение расчетов;
- анализ полученных данных и их верификация на основе экспериментальных данных.

Исходная 3D-модель автопоезда представлена на рисунке 8. Результаты расчета распределения давления в продольной плоскости автомобиля и полуприцепа, а также поле векторов скорости в этой плоскости приведены на рисунке 9.



**Рисунок 9.**

Анализ результатов расчетов позволяет установить зоны избыточного давления и разрежения, зоны отрыва потока на верхней кромке крыши кабины, застойные зоны за кабиной и полуприцепом, коэффициент аэродинамического сопротивления и т.д.

Кроме того, были рассчитаны:

- коэффициенты составляющих сил  $C_y$ ,  $C_z$  и моментов  $M_x$ ,  $M_y$  и  $M_z$ ;
- распределение коэффициента  $C_p$  в вертикальных и горизонтальных сечениях кабины;
- изолинии коэффициента давления на поверхности;
- линии тока вдоль боковых и верхней поверхностей кабины.

Для верификации расчетной модели с помощью технологии быстрого прототипирования была изготовлена масштабная модель (1:20) автопоезда и выполнены экспериментальные исследования в аэродинамической трубе по определению коэффициента  $C_x$ .

### **Выводы**

1. На первых двух этапах снижение расхода топлива на автомобилях КАМАЗ за счет применения внешних аэродинамических устройств составило от 4 до 6 %.

Для автомобилей КАМАЗ с низким тентом эффективна установка на крыше кабины простых в изготовлении щитовых (плоских) обтекателей и спойлеров. Для автомобилей с высоким тентом целесообразна установка на крыше кабины объемных обтекателей и спойлеров.

Установка противосолнечных козырьков приводит к повышению давления в зоне воздухозаборника и, соответственно, уменьшению поступления пыли в систему питания двигателя воздухом.

Использование испытанных конструкций аэродинамических противосолнечных козырьков на автомобилях с тентом и самосвалах приводит к увеличению расхода топлива на 1...3%. Оптимизацией геометрических характеристик козырька на автомобилях без тента можно получить экономию топлива до 1,5...2,5%.

2. В процессе реализации этапов три и четыре получено до 5-7 % экономии топлива. При этом существенно улучшен экстерьер автомобилей, уменьшены зоны самозабрызгиваемости, повышена эффективность систем охлаждения двигателя, отопления и вентиляции.

Процесс доводки автомобилей методом натуральных испытаний требует значительных материальных и временных ресурсов.

3. Реализация пятого этапа позволила разработать конструкции автомобилей на уровне лучших зарубежных аналогов. Причем основной объем работ по оптимизации выполнен с использованием методологии компьютерного моделирования. Применение суперкомпьютеров позволяет существенно сократить сроки разработки нового конкурентоспособ-

ного продукта.

4. Верификация расчетных моделей показала, что доводку внешних форм автомобиля и оптимизацию внутренних потоков можно выполнять на компьютерных моделях.
5. В этом случае при оптимизации формы кабины нет необходимости в изготовлении масштабной модели автомобиля для установки ее в рабочей части аэродинамической трубы или полнокомплектного опытного образца автомобиля при проведении испытаний в дорожных условиях.

### Литература

1. Бирман. Течения вблизи плохообтекаемых тел, применимые к аэродинамике автомашин // Труды общества инженеров-механиков США. Теоретические основы инженерных расчетов. – 1980. т. 102. № 3 – С. 85–96.
2. Евграфов А.Н., Высоцкий М.С., Титович А.И. Аэродинамика магистральных автопоездов. – Мн.: Наука и техника, 1988. – 232 с.
3. Евграфов А.Н., Высоцкий М.С. Аэродинамика колесного транспорта. – Мн.: НИРУП Белавтотракторостроение, 2001. – 368 с.
4. Петрушов В.А. Автомобили и автопоезда: Новые технологии исследования сопротивления качения и воздуха. – М.: ТОРУС ПРЕСС, 2008. – 352 с.: ил.
5. Петрушов В.А. Оценка аэродинамических качества сопротивлений качению автомобиля в дорожных условиях // Автомобильная промышленность. – 1985. № 11. – С. 14-20.
6. Кюхеман Д. Аэродинамическое проектирование самолетов / Пер. с англ. Н.А. Благовещенский, Г.И. Майкапар; Под ред. Г.И. Майкапара. – М.: Машиностроение, 1983. – 656 с.
7. Аэродинамика автомобиля / Под ред. В.Г. Гухо; пер. с нем. – М.: Машиностроение, 1987. – 424 с.
8. Аэродинамика автомобиля: сб. статей / Пер. с англ. – М.: Машиностроение, 1984. – 376 с.
9. TamasLojos. Drag reduction by the production of a separation bubble on the front of a bluff body // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. - Vol. 22 - 1986. – P. 331-338.
10. Ватолин А.К. Пути снижения лобового сопротивления большегрузных автомобилей на основе исследований моделей в аэродинамических трубах: Дис ... канд. техн. наук: - Казань, 1983. – 178 с.

### **Исследование процесса теплоотдачи в сетчатой матрице роторного теплообменника**

Алексеев Р., к.т.н. доц. Костюков А.В., Косач Л.А.  
 Университет машиностроения  
 8(495) 223-05-23 доб. 1054 kostukov123@yandex.ru

*Аннотация.* Приводятся результаты экспериментальных и численных исследований тепловых процессов в сетчатой матрице роторного каркасного теплообменника. Получено близкое совпадение расчетных и экспериментально определенных значений степени регенерации и гидравлического сопротивления роторного теплообменника с сетчатой матрицей.

*Ключевые слова:* компактные теплообменники, моделирование теплогидравлических процессов, теплоотдача пористых матриц.

Одним из путей повышения эффективности применяемых в настоящее время в распределенной энергетике микротурбин является установка в них теплообменников со сверхвысокой степенью регенерации (95-97%). По этому направлению идет американская компания Wilson, разрабатывающая микротурбину мощностью 300 кВт с электрическим КПД 50% [1]. Получение степени регенерации на уровне 95-97% при приемлемых габаритах возможно в компактных роторных теплообменниках. В таких теплообменниках, как правило, используется сверхкомпактная пористая теплопередающая матрица. В частности в роторном тепло-