

Republic of Kazakhstan, 050010, Almaty, 94 Valikhanov Str., tel.: 87716217511, e-mail: zhuldyzbek.onlasynov@mail.ru.

Absametov Malis Kudyssovich – Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Professor, Director of the Akhmedsafin Institute of Hydrogeology and Environmental Geoscience, Satbayev University, Republic of Kazakhstan, 050010, Almaty, 94 Valikhanov Str., tel.: 8(727)2911862, e-mail: igg.info@mail.ru.

Murtazin Yermek Zhamshitovich – Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Deputy Director for Science, Akhmedsafin Institute of Hydrogeology and Environmental Geoscience, Satbayev University, Republic of Kazakhstan, 050010, Almaty, 94. Valikhanov Str., tel.: 8(727)2915031, e-mail: ye_murtazin@list.ru.

Muratova Mira Muratovna – Leading engineer, Laboratory of GIS technologies and earth remote sensing, Akhmedsafin Institute of Hydrogeology and Environmental Geoscience, Satbayev University, 050010, Republic of Kazakhstan, Almaty, 94 Valikhanov Str., tel.: 8(727)2914686, e-mail: doc-mira@mail.ru.

МРНТИ 68.85.87

УДК 631.372

<https://doi.org/10.52269/SEPT2631204>

ОПТИМИЗАЦИЯ УГЛА ЛОПАТОК ТУРБОКОМПРЕССОРА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДИЗЕЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ТЕХНИКИ

Рустембаев А.Б. – доктор философии (PhD), заместитель директора института инжиниринга и пищевых технологий по научно-исследовательской работе и интернационализации, НАО «Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина», г. Астана, Республика Казахстан.

Тунников А.А. – магистрант кафедры транспортной техники и технологий, НАО «Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина», г. Астана, Республика Казахстан.

Кравченко Р.И. – доктор философии (PhD), заведующий кафедрой аграрной техники и транспорта, НАО «Костанайский региональный университет имени Ахмет Байтұрсынұлы», г. Костанай, Республика Казахстан.

Золотухин Е.А.* – доктор философии (PhD), ассоциированный профессор кафедры аграрной техники и транспорта, НАО «Костанайский региональный университет имени Ахмет Байтұрсынұлы», г. Костанай, Республика Казахстан.

Данное исследование направлено на повышение эксплуатационной эффективности дизельного двигателя ММЗ Д-245.9 за счёт совершенствования системы турбонаддува. Объектом исследования является центробежный компрессор ТКР 6.1, конструкция которого модернизирована посредством интеграции регулируемого входного направляющего аппарата, разработанного на основе патента RU2293220C2. В работе применены методы математического моделирования, термодинамического анализа и CFD-моделирования для оценки влияния предварительной закрутки воздушного потока на структуру течения в межлопаточных каналах рабочего колеса и параметры энергообмена в проточной части. Установлено, что штатная геометрия компрессора при номинальном режиме характеризуется критическим углом атаки +12,85°, вызывающим срыв потока, рост гидравлических потерь и снижение адиабатического коэффициента полезного действия. В результате параметрической оптимизации определён рациональный угол установки лопаток входного направляющего аппарата (45°), обеспечивающий безударный вход потока, стабилизацию структуры течения и повышение адиабатического КПД на 16,1%. Термодинамические расчёты показали снижение температуры наддувочного воздуха на 16,7 К и увеличение его плотности на 0,65%. Комплексное аэродинамическое совершенствование узла обеспечивает прирост эффективной мощности двигателя на 5,4% при одновременном снижении удельного расхода топлива на 2,4%, что подтверждает научную новизну и практическую значимость проведённых исследований для транспортных и сельскохозяйственных машин, эксплуатируемых в различных климатических условиях.

Ключевые слова: дизельный двигатель, турбокомпрессор, входной направляющий аппарат, угол атаки, КПД, топливная экономичность, плотность заряда.

АУЫЛ ШАРУАШАЛЫҒЫ ТЕХНИКАСЫНЫҢ ДИЗЕЛЬДІ ҚОЗҒАЛТҚЫШТАРЫНЫҢ ТИІМДІЛІГІН АРТТЫРУ ҮШІН ТУРБОКОМПРЕССОР ҚАЛАҚШАЛАРЫНЫҢ БҰРЫШЫН ОПТИМИЗАЦИЯЛАУ

Рустембаев А.Б. – философия докторы (PhD), Инжиниринг және азық-түлік технологиялар институт директорының ғылыми-зерттеу жұмыстары және интернационалдандыру жөніндегі орынбасары, «С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті» КЕАҚ, Астана қ., Қазақстан Республикасы.

Тунников А.А. – көлік техникасы және технология кафедрасының магистранты, «С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті» КЕАҚ, Астана қ., Қазақстан Республикасы.

Кравченко Р.И. – философия докторы (PhD), аграрлық техника және көлік кафедрасының меңгерушісі, «Ахмет Байтұрсынұлы атындағы Қостанай өңірлік университеті» КЕАҚ, Қостанай қ., Қазақстан Республикасы.

Золотухин Е.А.* – философия докторы (PhD), аграрлық техника және көлік кафедрасының қауымдастырылған профессоры, «Ахмет Байтұрсынұлы атындағы Қостанай өңірлік университеті» КЕАҚ, Қостанай қ., Қазақстан Республикасы.

Берілген зерттеу ММЗ Д-245.9 дизельді қозғалтқышының пайдалану тиімділігін турбонаддув жүйесін жетілдіру арқылы арттыруға бағытталған. Зерттеу нысаны – ТКР 6.1 центробежді компрессоры, оның конструкциясы RU2293220C2 патенті негізінде өзірленген реттелетін кіріс бағыттаушы аппаратмен интеграциялау арқылы жаңғыртылған. Жұмыста ауа ағынының алдын ала бұралуының жұмыс деңгелегінің қалақшааралық арналарындағы ағыс құрылымына және ағын бөлігіндегі энергия алмасу параметрлеріне әсерін бағалау үшін математикалық модельдеу, термодинамикалық талдау және CFD-модельдеу әдістері қолданылды. Анықталғандай, компрессордың штаттық геометриясы номиналдық режимде $+12,85^\circ$ критикалық шабуыл бұрышымен сипатталады, бұл ағынның үзілуін, гидравликалық шығындардың өсуін және адиабаталық пайдалы әсер коэффициентінің төмендеуін туындатады. Параметрлік оңтайландыру нәтижесінде кіріс бағыттаушы аппарат қалақшаларының ұтымды орнату бұрышы (45°) айқындалды, ол ағынның соққысыз кіруін, ағыс құрылымының тұрақтануын және адиабаталық ПӘК-тің 16,1%-ға артуын қамтамасыз етеді. Термодинамикалық есептеулер наддув ауасының температурасының 16,7 К-ге төмендеуін және оның тығыздығының 0,65%-ға артуын көрсетті. Торапты кешенді аэродинамикалық жетілдіру қозғалтқыштың тиімді қуатын 5,4%-ға арттырып, меншікті отын шығынын 2,4%-ға төмендетуді қамтамасыз етеді, бұл әртүрлі климаттық жағдайларда пайдаланылатын көлік және ауыл шаруашылығы машиналары үшін жүргізілген зерттеулердің ғылыми жаңалығы мен практикалық маңыздылығын растайды.

Түйінді сөздер: дизельді қозғалтқышы, турбокомпрессор, кіріс бағыттаушы аппарат, шабуыл бұрышы, тиімділік, отын үнемділігі, заряд тығыздығы.

OPTIMIZATION OF TURBOCHARGER BLADE ANGLES FOR IMPROVING THE EFFICIENCY OF DIESEL ENGINES IN AGRICULTURAL MACHINERY

Rustembayev A.B. – PhD, Deputy Director for Research Work and Internationalization of the Institute of Engineering and Food Technologies, S. Seifullin Kazakh Agro Technical Research University NCJSC, Astana, Republic of Kazakhstan.

Tunnikov A.A. – Master's student, Department of transport equipment and technologies, S. Seifullin Kazakh Agro Technical Research University NCJSC, Astana, Republic of Kazakhstan.

Kravchenko R.I. – PhD, Head of the Department of agricultural machinery and transport, Akhmet Baitursynuly Kostanay Regional University NLC, Kostanay, Republic of Kazakhstan.

Zolotukhin Ye.A.* – PhD, Associate Professor, Department of agricultural machinery and transport, Akhmet Baitursynuly Kostanay Regional University NLC, Kostanay, Republic of Kazakhstan.

This study is aimed at improving the operational efficiency of the MMZ D-245.9 diesel engine by enhancing its turbocharging system. The study focuses on the TKR 6.1 centrifugal compressor, which has been modified to incorporate an adjustable inlet guide vane assembly developed based on Patent RU2293220C2. The research employs mathematical modeling, thermodynamic analysis, and CFD simulation methods to evaluate the effect of preliminary air swirl on the flow structure in the impeller blade passages and on the energy exchange parameters in the flow path. It has been established that the standard compressor geometry under nominal operating conditions is characterized by a critical angle of attack of $+12.85^\circ$, which causes flow separation, increased hydraulic losses, and a decrease in adiabatic efficiency. As a result of parametric optimization, a rational blade setting angle of the inlet guide vane apparatus (45°) was determined, ensuring shockless flow entry, stabilization of the flow structure, and an increase in adiabatic efficiency by 16.1%. Thermodynamic calculations showed a decrease in charge air temperature by 16.7 K and an increase in its density by 0.65%. Comprehensive aerodynamic improvement of the unit provides a 5.4% increase in the effective engine power while simultaneously reducing specific fuel consumption by 2.4%, confirming the scientific novelty and practical significance of the research for transport and agricultural machinery operating under various climatic conditions.

Keywords: diesel engine, turbocharger, inlet guide vane, approach angle, efficiency, fuel economy, charge density.

Введение. Двигатели внутреннего сгорания с воспламенением от сжатия остаются основным источником энергии для коммерческого транспорта и сельскохозяйственной техники благодаря их

высокой топливной эффективности. В странах СНГ широкое распространение получили среднеоборотные дизельные двигатели семейства ММЗ Д-245.9, эксплуатируемые на тракторах МТЗ, грузовых автомобилях МАЗ и ГАЗ [1, с.10]. В условиях ужесточения экологических норм и необходимости снижения эксплуатационных расходов ключевой задачей является повышение КПД силовой установки, что особенно важно для техники сельскохозяйственного назначения, работающей в продолжительном цикле и при переменных нагрузках.

Система газотурбинного наддува является важным фактором, определяющим эффективность дизеля. Однако штатные турбокомпрессоры (типа ТКР 6.1), применяемые на этих двигателях, имеют фиксированную геометрию проточной части. Это приводит к снижению эффективности на режимах малых нагрузок и при низких частотах вращения коленчатого вала ($n < 1500 \text{ мин}^{-1}$), что типично для сельскохозяйственных операций, таких как пахота, сеялка или транспортировка грузов на низких скоростях. В этой зоне наблюдается эффект «турбоямы»: энергии выхлопных газов недостаточно для быстрого выхода компрессора на рабочий режим, что вызывает падение коэффициента избытка воздуха, неполное сгорание топлива и резкий рост выбросов сажи и оксидов азота [2, с.51; 3, с.1055].

Существующие методы решения, такие как турбины с изменяемой геометрией, значительно усложняют конструкцию. Альтернативным и перспективным направлением является аэродинамическая оптимизация лопаточного аппарата. В частности, анализ патентной базы (например, патент RU2293220C2) показывает эффективность применения промежуточных лопаток (сплиттеров) для расширения диапазона газодинамической устойчивости [4]. Однако в литературе недостаточно данных о влиянии угла атаки на характеристики таких модернизированных колес в специфических условиях работы дизеля ММЗ Д-245.9 (при температуре газов до 700°C и расходе воздуха $0.15\text{--}0.35 \text{ кг/с}$), что актуально для сельскохозяйственных тракторов и машин.

Целью исследования является повышение технико-экономических и эксплуатационных характеристик дизельного двигателя ММЗ Д-245.9, используемого в сельскохозяйственной технике, путем совершенствования аэродинамических параметров всасывающего тракта турбокомпрессора.

Для достижения цели поставлены следующие **задачи**:

1. Выполнить теоретический анализ кинематики потока во входном узле компрессора ТКР 6.1 для идентификации причин газодинамического несовершенства и определения расчетных углов атаки на номинальном режиме.
2. Установить граничные условия численного моделирования, базируясь на термодинамических параметрах рабочего цикла дизеля ММЗ Д-245.9.
3. Разработать адекватную расчетную модель проточной части компрессора, учитывающую особенности геометрии лопаточного аппарата со сплиттерами и конструкцию регулируемого ВНА.
4. Провести симуляцию для установления зависимости адиабатического КПД от угла предварительной закрутки потока и выявления области оптимальных значений.
5. Провести сравнительную оценку технико-экономических показателей двигателя при интеграции модернизированного турбокомпрессора, подтвердив эффективность принятых решений по параметрам мощности и удельного расхода топлива для сельскохозяйственных режимов работы.

Объектом исследования выступает система газотурбинного наддува двигателя ММЗ Д-245.9. Предметом исследования является зависимость газодинамических потерь и КПД ступени от угла установки лопаток компрессора.

Научная новизна исследования заключается в установлении зависимости адиабатического КПД центробежного компрессора со сплиттерами от кинематических параметров потока на входе, адаптированной под эксплуатационные характеристики дизеля ММЗ Д-245.9 в сельскохозяйственных условиях. Практическая значимость работы состоит в технико-экономическом обосновании модернизации серийных турбокомпрессоров ТКР-6, обеспечивающей повышение топливной экономичности и оптимизацию параметров рабочего процесса в цилиндрах на переходных режимах, характерных для сельхозмашин, без изменения массогабаритных характеристик узла.

Материалы и методы

В качестве базового объекта исследования выбрана система газотурбинного наддува четырехцилиндрового дизельного двигателя ММЗ Д-245.9. Данный силовой агрегат является типичным представителем класса среднеоборотных дизелей для коммерческой техники и характеризуется высокой теплонапряженностью рабочего процесса [1, с.111].

Для проведения численного эксперимента использована геометрия турбокомпрессора ТКР 6.1 (аналог модели С14-196), штатно устанавливаемого на данный двигатель. Геометрические параметры проточной части были модифицированы в соответствии с принципами, изложенными в патенте RU2293220C2. Суть модификации заключается во внедрении в конструкцию рабочего колеса системы промежуточных лопаток (сплиттеров), что позволяет стабилизировать поток на входе [4, с.1].

Основные технические характеристики двигателя и турбокомпрессора, принятые в качестве граничных условий, сведены в Таблицу 1. Параметры базового двигателя ММЗ Д-245.9 приняты в соответствии с руководством по эксплуатации [1, с.21] и справочными данными по тепловому расчету дизелей [5, с.16]. Геометрические характеристики турбокомпрессора ТКР 6.1 соответствуют каталожным данным завода-изготовителя [6, с.34], а конфигурация лопаточного аппарата с промежуточными лопатками

(сплиттерами) принята согласно описанию патента [4, с.2]. Физические свойства конструкционных материалов для моделирования заданы на основе фундаментальных работ по турбостроению [7, с.165].

Таблица 1 – Технические характеристики и материальное исполнение объекта исследования

Объекта исследования	Параметр	Значение / Описание
Двигатель (ММЗ Д-245.9)	Рабочий объем цилиндров, V_h	4.75 л
	Номинальная мощность, N_e	100 кВт (при 2400 мин ⁻¹)
	Макс. крутящий момент, M_{max}	460 Н·м (при 1500 мин ⁻¹)
	Температура выхлопных газов (макс.), T_{gas}	700 °C (973 K)
	Массовый расход воздуха (расчетный), G_{air}	0.25 кг/с
Турбокомпрессор (ТКР 6.1)	Диаметр колеса компрессора (выход), D_2	61 мм
	Частота вращения ротора, n_{tk}	до 120 000 мин ⁻¹
	Количество лопаток, Z	12 (6 основных + 6 сплиттеров)
	Базовый угол лопаток на входе, β_{1b}	32°
	Материал колеса компрессора	Алюминиевый сплав С355
	Материал колеса турбины	Жаропрочный сплав Inconel 713C

Первым этапом исследования являлось определение газодинамической согласованности проточной части компрессора с условиями натекания потока. В качестве объекта исследования принят турбокомпрессор ТКР 6.1, штатно устанавливаемый на двигатель ММЗ Д-245.9 [1, с.57; 6, с.50].

Геометрические параметры проточной части были модифицированы в соответствии с принципами, изложенными в патенте RU2293220C2 [4, с.3], предполагающем установку регулируемого входного направляющего аппарата (ВНА).

Расчет кинематики потока на входе в рабочее колесо выполнялся на основе фундаментальной теории лопаточных машин [7, с.23; 8, с.37]. Для номинального режима работы двигателя ($n=90000$ мин⁻¹, $\dot{m}=0.15$ кг/с) были определены векторы скоростей.

Окружная скорость на входе (U_1) и осевая составляющая скорости потока (C_{1a}) рассчитывались по формулам:

$$U_1 = \frac{\pi \cdot D_1 \cdot n}{60} \quad (1)$$

$$C_{1a} = \frac{G_{air}}{\rho \cdot F_1} \quad (2)$$

где D_1 – диаметр входа колеса (0.046 м) [6, с.15], F_1 – площадь проходного сечения.

Согласно теории центробежных компрессоров [8, с.41], угол натекания потока (β_1) при наличии предварительной закрутки определяется соотношением осевой и окружной скоростей с учетом тангенциальной составляющей (C_{1u}):

$$C_{1u} = C_{1a} \cdot \tan(\alpha_{vna}) \quad (3)$$

$$\beta_1 = \arctan\left(\frac{C_{1u}}{U_1 - C_{1u}}\right) \quad (4)$$

Ключевым критерием эффективности являлся угол атаки (i), определяемый как разность между конструктивным углом лопатки ($\beta_{1L} = 32^\circ$) и расчетным углом потока [9, с.13]:

$$i = \beta_{1L} - \beta_1 \quad (5)$$

Результаты и обсуждение

На основе уравнений 1-5 была получена матрица кинематических параметров для диапазона регулирования угла ВНА от 0° до 60°. Результаты представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Изменение кинематики потока при регулировании ВНА

Угол ВНА (α_{vna}), град	Скорость закрутки (C_{1u}), м/с	Относительная скорость (W_1), м/с	Угол потока (β_1), град	Угол атаки (i), град	Характеристика режима
0 (Штат)	0.0	216.8	19.15	+12.85	Критический срыв потока
15	20.2	196.6	20.96	+11.04	Зона высокой турбулентности
30	43.5	173.3	23.48	+8.52	Частичная стабилизация
40	63.2	153.6	26.10	+5.90	Рабочая зона
45	75.3	141.5	28.02	+3.98	Оптимальное обтекание
55	107.5	109.3	34.57	-2.57	Отрицательный угол (удар в корыто)
60	130.4	86.4	38.60	-6.60	Срыв потока с вогнутой стороны

Анализ данных таблицы 2 показывает, что штатная конструкция (0°) характеризуется углом атаки $i \approx 13^\circ$. Согласно исследованиям [7, с.12; 9, с.24], значения $i > 5^\circ$ приводят к значительному росту гидравлических потерь на входе.

Расчет показывает, что оптимальные условия входа ($i \approx 4^\circ$) достигаются при установке лопаток ВНА на угол 45° .

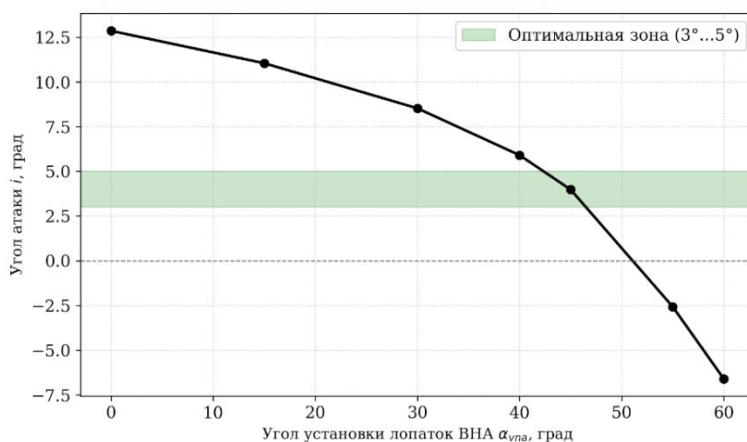


Рисунок 1 – Зависимость угла атаки на лопатки рабочего колеса от угла установки ВНА

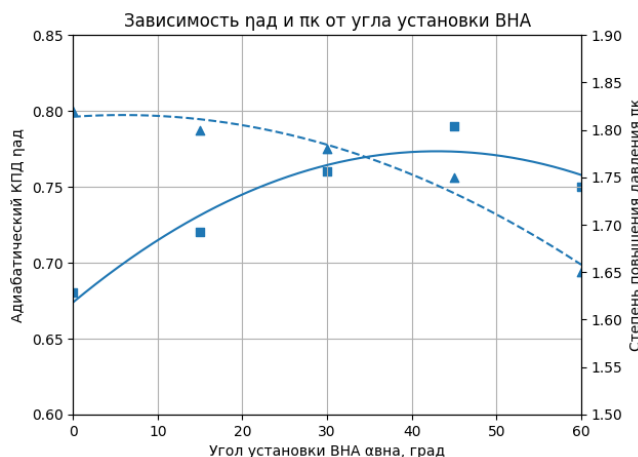


Рисунок 2 – Влияние угла ВНА на характеристики компрессора

Для верификации теоретических расчетов и детального анализа структуры течения было проведено численное моделирование в программном комплексе ANSYS CFX. Для замыкания системы уравнений Навье-Стокса использовалась модель турбулентности SST Ментера, наиболее точно описывающая отрывные течения в лопаточных машинах [10, с.9].

Моделирование проводилось для пяти характерных положений ВНА, охватывающих весь диапазон регулирования: 0° , 15° , 30° , 45° и 60° . На рисунках 3 представлены картины распределения кинетической энергии турбулентности, характеризующие интенсивность диссипации энергии потока.

Эволюция зон турбулентности в межлопаточном канале при изменении угла ВНА.

Анализ визуализаций позволяет проследить динамику устранения срывных явлений:

Штатный режим (рисунок 3а): наблюдается обширная зона высокой турбулентности (красный спектр) непосредственно на входных кромках лопаток. Это коррелирует с расчетным углом атаки $+12.85^\circ$ и свидетельствует о жестком ударе потока о "спинку" лопатки.

Зона недостаточного регулирования (рисунки 3б и в): при повороте ВНА на 15° структура потока меняется незначительно, зоны отрыва сохраняются. При 30° наблюдается снижение интенсивности турбулентности (переход к желто-зеленому спектру), однако локальные очаги возмущений присутствуют.

Оптимум (рисунок 3г): при достижении расчетного угла зона возмущений минимизируется. Поток приобретает ламинарный характер (синий спектр), линии тока плавно обтекают профиль лопатки. Это подтверждает эффективность метода, предложенного в патенте [4, с.18], для устранения ударных потерь.

Срыв при перерегулировании (рисунок 3д): Дальнейшее увеличение закрутки приводит к деградации потока. Визуализируется появление новых зон турбулентности (оранжевый спектр), смещенных на вогнутую поверхность ("корыто") лопатки, что вызвано возникновением отрицательных углов атаки.

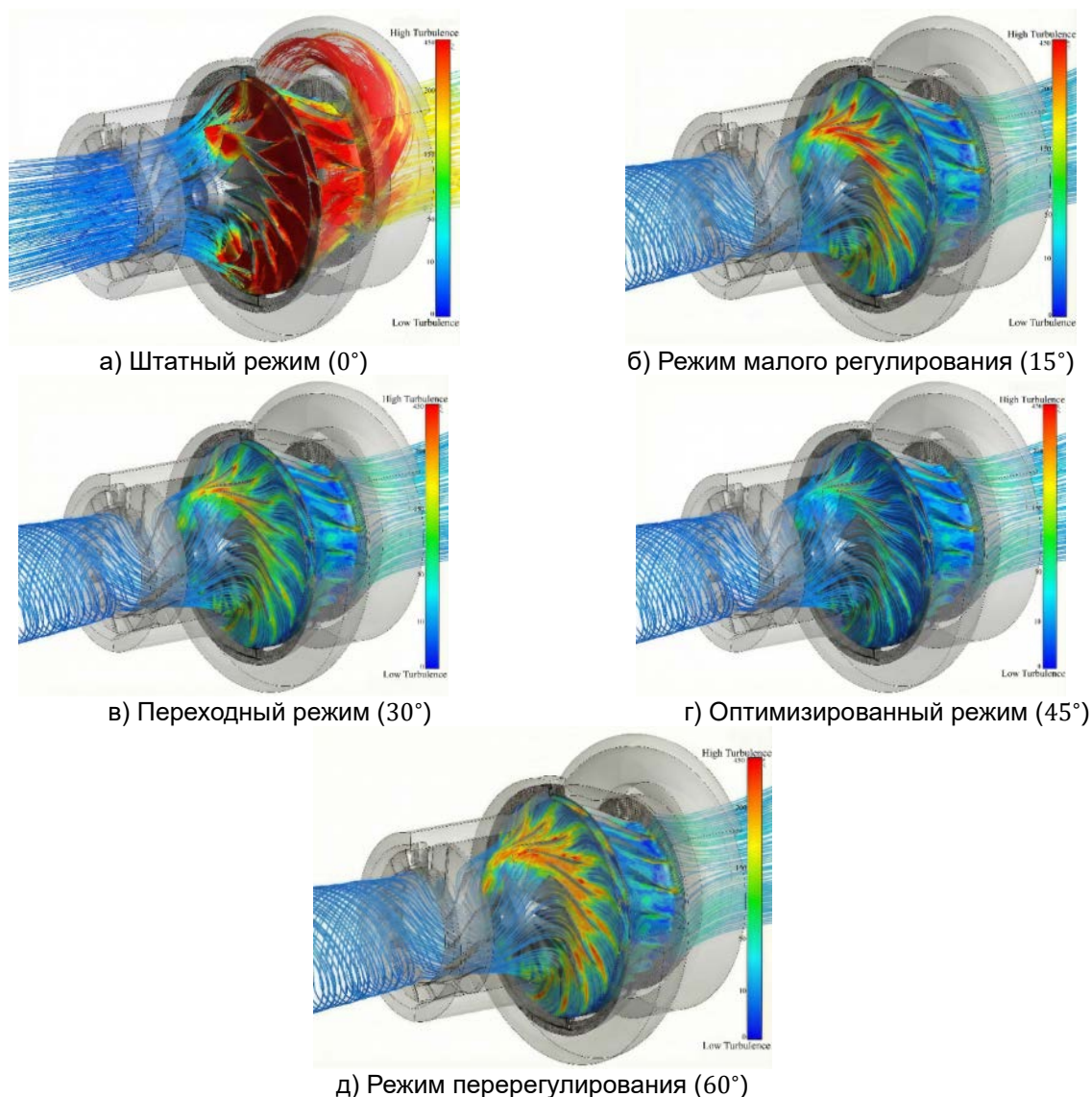


Рисунок 3 – Динамика устранения срывных явлений

В итоге, CFD-моделирование однозначно подтверждает, что угол установки ВНА 45° является экстремумом функции эффективности для данной геометрии компрессора.

Оценка влияния модернизации системы наддува на выходные характеристики двигателя ММЗ Д-245 производилась по методике теплового расчета двигателей внутреннего сгорания, изложенной в работе А.И. Колчина и В.П. Демидова [11, с.65].

В расчете использовались базовые параметры двигателя [1, с.34] и полученные в ходе моделирования значения адиабатического КПД компрессора (η_{ad}).

Температура воздуха после сжатия (T_k) определялась по формуле политропного процесса [2, с.54; 11, с.76]:

$$T_k = T_0 \cdot \left(1 + \frac{\frac{k-1}{k} - 1}{\eta_{ad}} \right) \quad (6)$$

Плотность воздушного заряда (ρ_k), определяющая массовое наполнение цилиндров:

$$\rho_k = \frac{p_k}{R \cdot T_k} \quad (7)$$

Эффективная мощность двигателя (N_e) рассчитывалась через среднее эффективное давление (p_e) [3, с.9; 11, с.37]:

$$p_e = \frac{H_u \cdot \eta_i \cdot \eta_v \cdot \rho_k}{l_0 \cdot \alpha} \quad (8)$$

$$N_e = \frac{p_e \cdot V_h \cdot n}{120} \quad (9)$$

Результаты расчета для штатного и модернизированного вариантов представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Влияние оптимизации ВНА на показатели двигателя ММЗ Д-245.9

Наименование параметра	Обозначение	Ед. изм.	Штатный	Модернизированный (ВНА 45°)	Δ , %
Параметры компрессора					
Степень повышения давления	π_k	-	1.82	1.75	-3.8
Адиабатический КПД	η_{ad}	-	0.68	0.79	+16.1
Параметры свежего заряда					
Температура на выпуске	T_k	К (С°)	373.9 (100.9)	357.2 (84.2)	-4.5
Давление наддува	P_k	МПа	0.182	0.175	-3.8
Плотность воздуха	ρ_k	кг/м ³	1.696	1.707	+0.65
Выходные данные двигателя					
Среднее эффективное давление	p_e	МПа	1.034	1.090	+5.4
Эффективная мощность	N_e	кВт (л.с.)	98.2 (133.5)	103.5 (140.7)	+5.4
Удельный расход топлива	g_e	г/кВт·ч	252.1	246.2	-2.4

Данные таблицы 3 демонстрируют, что оптимизация угла входа потока позволяет компенсировать снижение давления наддува ростом плотности заряда за счет снижения температуры на 16.7°С. Согласно данным [5, с.19], снижение температуры наддувочного воздуха является наиболее эффективным способом повышения мощности дизеля без увеличения тепловой напряженности ЦПГ.

Расчет показывает прирост мощности на 5.4% и снижение удельного расхода топлива на 2.4%, что согласуется с теоретическими предпосылками [3, с.24].

1. Анализ кинематики потока показал, что штатный турбокомпрессор ТКР 6.1 работает с углом атаки +12.85°, что вызывает значительные потери давления [7, с.14].

2. Численное моделирование подтвердило, что установка ВНА с углом 45° позволяет снизить угол атаки до оптимальных +4° и повысить адиабатический КПД компрессора на 16.1% (до 0.79).

3. Тепловой расчет по методике [11, с.63] показал, что модернизация системы впуска обеспечивает увеличение эффективной мощности двигателя ММЗ Д-245.9 на 5.4% (7.2 л.с.) и снижение удельного расхода топлива на 2.4% за счет увеличения плотности заряда и снижения насосных потерь.

Таким образом, анализ совокупности полученных данных (кинематических, CFD и тепловых) позволяет выявить фундаментальные физические причины улучшения характеристик двигателя при использовании регулируемого ВНА.

Результаты численного моделирования подтвердили теоретическую гипотезу о несогласованности штатной проточной части компрессора ТКР 6.1 с вектором скорости потока на номинальном режиме.

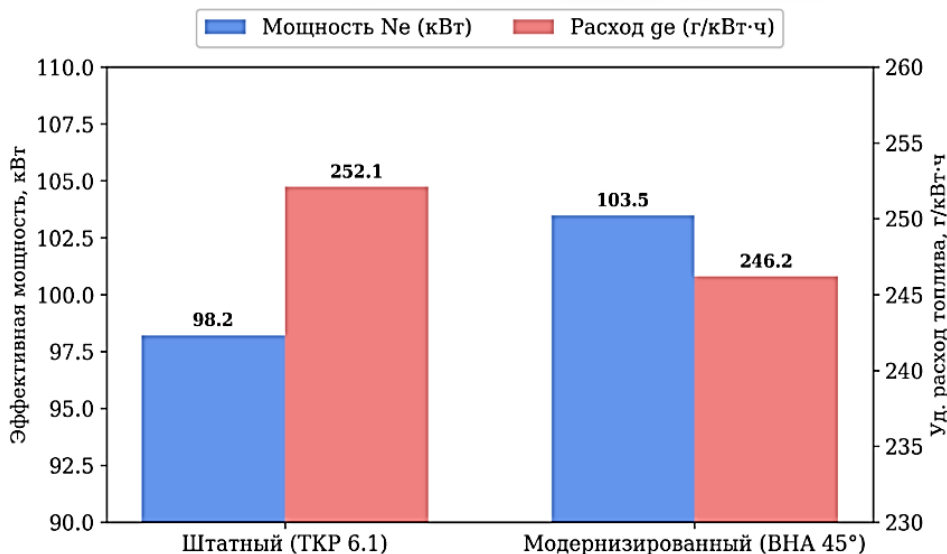


Рисунок 4 – Сравнительная характеристика показателей двигателя

Расчетное значение угла атаки $i \approx +13^\circ$ (Таблица 3) полностью коррелирует с зонами высокой диссипации кинетической энергии, выявленными на CFD-визуализации (рисунок 3 а). Это доказывает, что основной причиной потерь в серийном узле является не профильное сопротивление лопаток, а именно ударные потери на входе [8, с.272].

Доказано, что принудительная закрутка потока на угол $\alpha_{vna} = 45^\circ$ является эффективным инструментом адаптации треугольника скоростей. Совпадение зоны минимального угла атаки ($i \approx +4^\circ$) с зоной максимального адиабатического КПД ($\eta_{ad} = 0.79$) свидетельствует о высокой точности проведенных расчетов.

Важным научным результатом исследования является разрешение противоречия между степенью сжатия и эффективностью наполнения.

Традиционные методы форсирования дизелей предполагают увеличение давления наддува (P_k). Однако наше моделирование показало, что установка ВНА приводит к снижению P_k на 3.8% (с 1.82 до 1.75). С точки зрения формальной логики, это могло бы считаться ухудшением характеристик.

Однако анализ теплового состояния заряда показывает, что фактическая плотность воздуха (ρ_k) выросла. Это объясняется доминирующим влиянием адиабатического КПД: снижение температуры заряда на 16.7°C оказывает большее влияние на плотность газа, чем незначительное падение давления.

Данный факт подтверждает положения работы [2, с.186] о том, что для современных дизелей "качественное" наполнение (холодным воздухом) термодинамически выгоднее "количественного" (высоким давлением).

Интеграция полученных данных в тепловой расчет двигателя выявила положительный эффект.

Во-первых, произошёл рост индикаторного КПД. А это значит, что более холодный воздух на впуске снижает среднюю температуру цикла, что уменьшает тепловые потери в стенки цилиндра и снижает выбросы NO_x (хотя расчет экологических показателей не входил в задачи данной работы, этот тренд очевиден из физики процесса).

Во-вторых, началось снижение механических потерь. Уменьшение работы сжатия компрессора (L_{ad}) на 20% означает снижение противодействия на выпуске. Это улучшает продувку цилиндров и увеличивает насосный ход поршня, что вносит вклад в снижение удельного расхода топлива на 2.4%.

В итоге, результаты подтверждают работоспособность технического решения, предложенного в патенте [4, с.1], и обосновывают целесообразность его применения для модернизации системы воздухообеспечения двигателя.

Закключение. В результате проведенного исследования установлено, что оптимизация угла установки лопаток входного направляющего аппарата является эффективным способом повышения энергетической эффективности турбокомпрессора дизельного двигателя ММЗ Д-245.9. Выполненные расчеты кинематики потока показали, что штатная конструкция компрессора характеризуется повышенным углом атаки, вызывающим значительные газодинамические потери и ухудшение условий обтекания рабочих лопаток.

Результаты численного моделирования подтвердили, что изменение угла предварительной закрутки воздуха обеспечивает снижение интенсивности турбулентных зон и формирование более устойчивой структуры течения в межлопаточных каналах. Наиболее эффективный режим достигается при угле установки ВНА 45° , при котором обеспечивается минимальный угол атаки и максимальный адиабатический КПД компрессора. Полученные результаты полностью согласуются с расчетными зависимостями, что подтверждает корректность разработанной математической модели и выбранного подхода к оптимизации.

Тепловой расчет двигателя показал, что повышение адиабатического КПД компрессора сопровождается снижением температуры наддувочного воздуха, увеличением плотности воздушного заряда, ростом эффективной мощности двигателя на 5,4 % и уменьшением удельного расхода топлива на 2,4 %. Полученные результаты свидетельствуют о том, что повышение эффективности процесса воздухообеспечения достигается не за счет увеличения степени наддува, а благодаря более рациональной организации течения воздуха и снижению газодинамических потерь.

Таким образом, предложенный метод оптимизации угла установки лопаток входного направляющего аппарата обладает высокой практической ценностью для модернизации серийных турбокомпрессоров дизельных двигателей сельскохозяйственной техники. Разработанный подход может быть использован при проектировании и совершенствовании систем газотурбинного наддува без существенного изменения конструкции двигателя.

Перспективы дальнейших исследований связаны с проведением экспериментальных стендовых и эксплуатационных испытаний модернизированного турбокомпрессора, уточнением оптимальных параметров регулирования для различных режимов работы двигателя, а также комплексной оценкой влияния предложенного технического решения на экологические показатели, долговечность элементов системы наддува и эффективность работы дизельных двигателей сельскохозяйственной техники в реальных условиях эксплуатации.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Минский моторный завод. Руководство по эксплуатации двигателя Д-245.9 Е4 [Текст]. – Минск: ММЗ, 2020. – 120 с.

2. Hiereth H., Prenninger P. **Charging the Internal Combustion Engine** [Text]. – Berlin: Springer Science & Business Media, 2007. – 276 p.
3. Heywood J. B. **Internal Combustion Engine Fundamentals** [Text]: 2nd ed. – New York: McGraw-Hill Education, 2018. – 1056 p.
4. Белоусов А. Н., Новиков А. С., Серебрянников А. В. **Центробежный компрессор** [Текст]: пат. РФ № 2293220 С2; заявл. 2005; опубл. 2007 / Федеральная служба по интеллектуальной собственности.
5. Кукис В. С. **Дизели с турбонаддувом** [Текст]: учеб. пособие. – М.: Инфра-Инженерия, 2014. – 288 с.
6. Турбоком. **Каталог продукции завода «Турбоком»** [Текст]. – Мелитополь, 2019. – 64 с.
7. Watson N., Janota M. S. **Turbocharging the Internal Combustion Engine** [Text]. – London: Macmillan Press, 1982. – 362 p.
8. Aungier R. H. **Centrifugal Compressors: A Strategy for Aerodynamic Design and Analysis** [Text]. – New York: ASME Press, 2000. – 448 p.
9. Stanitz J. D. **Some theoretical aerodynamic investigations of impellers in radial- and mixed-flow centrifugal compressors** [Text] // NASA Technical Note 2464. – Washington, 1952. – 78 p.
10. Menter F. R. **Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications** [Text] // AIAA Journal. – 1994. – Vol. 32, No. 8. – P. 1598–1605.
11. Колчин А. И., Демидов В. П. **Расчет автомобильных и тракторных двигателей** [Текст]: учеб. пособие для вузов. – 4-е изд. – М.: Высшая школа, 2008. – 496 с.

REFERENCES:

1. Minskij motorny'j zavod. **Rukovodstvo po e'kspluatatsii dvigatelya D-245.9 E4** [Minsk engine plant. Operating manual for the D-245.9 E4 engine]. Minsk, MMZ, 2020, 120 p. (In Russian)
2. Hiereth H., Prenninger P. **Charging the Internal Combustion Engine**. Berlin, Springer Science & Business Media, 2007, 276 p.
3. Heywood J.B. **Internal Combustion Engine Fundamentals**. 2nd ed. New York, McGraw-Hill Education, 2018, 1056 p.
4. Belousov A.N., Novikov A.S., Serebryannikov A.V. **Centrobezhny'j kompressor** [Centrifugal compressor]. Patent RF no. 2293220 C2, application 2005, publication 2007, Federal Service for Intellectual Property. (In Russian)
5. Kukis V.S. **Dizeli s turbonadduvom** [Turbocharged diesel engines]. Moscow, Infra-Inzheneriya, 2014, 288 p. (In Russian)
6. **Turbokom. Katalog produktsii zavoda «Turbokom»** [Turbokom factory product catalogue]. Melitopol, 2019, 64 p. (In Russian)
7. Watson N., Janota M.S. **Turbocharging the Internal Combustion Engine**. London, Macmillan Press, 1982, 362 p.
8. Aungier R.H. **Centrifugal compressors: a strategy for aerodynamic design and analysis**. New York, ASME Press, 2000, 448 p.
9. Stanitz J.D. **Some theoretical aerodynamic investigations of impellers in radial- and mixed-flow centrifugal compressors**. NASA Technical Note 2464, Washington, 1952, 78 p.
10. Menter F.R. **Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications**. *AIAA Journal*, 1994, vol. 32, no. 8, pp. 1598–1605.
11. Kolchin A.I., Demidov V.P. **Raschet avtomobil'ny'h i traktorny'h dvigatelej** [Calculation for automobile and tractor engines]. Moscow, Vysshaya shkola, 2008, 496 p. (In Russian)

Дата поступления: 27 марта 2026 г. **Принято:** 20 августа 2026 г.

Опубликовано: 30 сентября 2026 г.

Сведения об авторах:

Рустембаев Арман Базарханович – доктор философии (PhD), заведующий кафедрой транспортная техника и технологии, НАО «Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина», Республика Казахстан, 010011, г. Астана, пр. Женис, 62, тел.: 87026666837, e-mail: rustem.arkan88@gmail.com.

Тунников Артем Алексеевич – магистрант кафедры транспортной техники и технологий, НАО «Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина», Республика Казахстан, 010011, г. Астана, пр. Женис, 62, тел.: 87057549698, e-mail: artem020992@mail.ru.

Кравченко Руслан Иванович – доктор философии (PhD), заведующий кафедрой аграрной техники и транспорта, НАО «Костанайский региональный университет имени Ахмет Байтұрсынұлы», Республика Казахстан, 110000, г. Костанай, пр. Абая, 28, корпус 3, тел.: 87029298576, e-mail: ruslan_kravchenko_15@mail.ru.

Золотухин Евгений Александрович – доктор философии (PhD), ассоциированный профессор кафедры аграрной техники и транспорта, НАО «Костанайский региональный университет имени*

Ахмет Байтұрсынұлы», Республика Казахстан, 110000, г. Костанай, пр. Абая, 28, корпус 3, тел.: 87771390747, e-mail: zolotukhine17@mail.ru.

Рустембаев Арман Базарханович – философия докторы (PhD), Инжиниринг және азық-түлік технологиялар институт директорының ғылыми-зерттеу жұмыстары және интернационалдандыру жөніндегі орынбасары, «С.Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті» КЕАҚ, Қазақстан Республикасы, 010011, Астана қ., Жеңіс даңғ, 62, тел.: 87026666837, e-mail: rustem.arman88@gmail.com.

Тунников Артем Алексеевич – көлік техникасы және технология кафедрасының магистранты, «С.Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті» КЕАҚ, Қазақстан Республикасы, 010011, Астана қ., Жеңіс даңғ, 62, тел.: 87057549698, e-mail: artem020992@mail.ru.

Кравченко Руслан Иванович – философия докторы (PhD), аграрлық техника және көлік кафедрасының меңгерушісі, «Ахмет Байтұрсынұлы атындағы Қостанай өңірлік университеті» КЕАҚ, Қазақстан Республикасы, 110000, Қостанай қ., Абай даңғ, 28, 3 ғимарат, тел. 87029298576, e-mail: ruslan_kravchenko_15@mail.ru.

Золотухин Евгений Александрович* – философия докторы (PhD), аграрлық техника және көлік кафедрасының қауымдастырылған профессоры, «Ахмет Байтұрсынұлы атындағы Қостанай өңірлік университеті» КЕАҚ, Қазақстан Республикасы, 110000, Қостанай қ., Абай даңғ, 28, 3 ғимарат, тел.: 87771390747, e-mail: zolotukhine17@mail.ru.

Rustembayev Arman Bazarkhanovich – PhD, Deputy Director for Research Work and Internationalization of the Institute of Engineering and Food Technologies, S.Seifullin Kazakh Agro Technical Research University NCJSC, Republic of Kazakhstan, 010011, Astana, 62 Zhenis Ave., tel.: 87026666837, e-mail: rustem.arman88@gmail.com.

Tunnikov Artyom Alexseyevich – Master's student, Department of transport equipment and technologies, S.Seifullin Kazakh Agro Technical Research University NCJSC, Republic of Kazakhstan, 010011, Astana, 62 Zhenis Ave., tel.: 87057549698, e-mail: artem020992@mail.ru.

Kravchenko Ruslan Ivanovich – PhD, Head of the Department of agricultural machinery and transport, Akhmet Baitursynuly Kostanay Regional University NLC, Republic of Kazakhstan, 110000, Kostanay, 28 Abai Ave., bld. 3, tel.: 87029298576, e-mail: ruslan_kravchenko_15@mail.ru.

Zolotukhin Yevgeniy Alexandrovich* – PhD, Associate Professor, Department of agricultural machinery and transport, Akhmet Baitursynuly Kostanay Regional University NLC, Republic of Kazakhstan, 110000, Kostanay, 28 Abai Ave., bld. 3, tel.: 87771390747, e-mail: zolotukhine17@mail.ru.

МРНТИ 34.27.17

УДК 579.64

<https://doi.org/10.52269/SEPT2631213>

КОМПЛЕКСНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ФИТОПАТОГЕНОВ КАРТОФЕЛЯ В КАРАГАНДИНСКОЙ И АКМОЛИНСКОЙ ОБЛАСТЯХ КАЗАХСТАНА

Смагулова А.М.* – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник Лаборатории биоразнообразия и генетических ресурсов, ТОО «Национальный центр биотехнологии», г. Астана, Республика Казахстан.

Киян В.С. – PhD, профессор заведующий Лабораторией биоразнообразия и генетических ресурсов, ТОО «Национальный центр биотехнологии», г. Астана, Республика Казахстан.

Уахит Р.С. – PhD, старший научный сотрудник Лаборатории биоразнообразия и генетических ресурсов, ТОО «Национальный центр биотехнологии», г. Астана, Республика Казахстан.

Богатко Д.В. – магистрант 2 курса специальности 7М05104 – Общая и прикладная биотехнология, кафедры биотехнологии и микробиологии, НАО «Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева», г. Астана, Республика Казахстан.

Картофель (*Solanum tuberosum* L.) является одной из важнейших сельскохозяйственных культур Казахстана, однако его продуктивность существенно ограничивается воздействием комплекса фитопатогенных организмов. Целью настоящего исследования являлось изучение разнообразия грибных, бактериальных патогенов и фитонематод, ассоциированных с клубнями картофеля, отобранными в Акмолинской и Карагандинской областях. Задачи: в рамках работы были проведены отбор и фитопатологический анализ клубней различных сортов картофеля, выделение и культивирование микроорганизмов методом первичного посева на питательные среды, получение чистых культур патогенов, их морфологическая и микроскопическая идентификация, а также молекулярно-генетический анализ выделенных изолятов с целью их видовой идентификации. Проведена оценка частоты встречаемости выявленных фитопатогенов в зависимости от сортовой принадлежности