

# МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫЕ КОМПОНЕНТЫ

УДК 631.354.2.076+532.5

А.А. КАЛИНОВСКИЙ, магистр техн. наук  
инженер-конструктор<sup>1</sup>

Ю.В. ЧУПРЫНИН, канд. техн. наук  
заведующий отделом<sup>1</sup>  
E-mail: y.chuprynin@mail.ru

А.А. НОВИКОВ  
заместитель генерального директора по техническим вопросам — главный инженер<sup>1</sup>  
E-mail: 293592466t@mail.ru

<sup>1</sup>ОАО «Гомсельмаш», г. Гомель, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 15.03.2018.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭЖЕКЦИОННОГО ОТСОСА ПЫЛИ ВЫХЛОПНЫМИ ГАЗАМИ В ГЛУШИТЕЛЕ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ МАШИНЫ

*Приведена методика и результаты твердотельного моделирования процесса эжекционного отсоса пыли из воздухозаборника двигателя выхлопными газами посредством эжектора, установленного в глушителе самоходной сельскохозяйственной уборочной машины. Проведено сравнение результатов моделирования с результатами экспериментальных исследований, сделаны выводы о причинах расхождения полученных данных в некоторых областях изменения исследуемых параметров. Получены зависимости исследуемых величин от изменяемых параметров. Подобраны оптимальные геометрические параметры эжектора, обеспечивающие эффективный отсос пыли без ухудшения условий работы двигателя. Выработаны рекомендации по проектированию систем эжекционного отсоса при разработке самоходных сельскохозяйственных уборочных машин, которые успешно используются в ОАО «Гомсельмаш».*

**Ключевые слова:** эжектор, глушитель, выхлопные газы, относительное давление, массовый расход, проходное сечение

**Введение.** Повышение ресурса двигателя за счет уменьшения попадания пыли в воздухозаборник двигателя является актуальной задачей, особенно для сельскохозяйственных машин, работающих в условиях повышенной запыленности.

Использование газодинамических процессов для очистки воздуха от посторонних примесей широко освещено в технической литературе и научных публикациях [1–7]. Теоретические основы газодинамических процессов отсоса воздуха эжекционным способом в различных ракурсах его использования изложены в специальной технической литературе [5–7]. Эжекционная очистка воздуха используется на промышленных предприятиях [1, 2] и в военной технике [4]. Известно также использование выхлопных газов для эжек-

ционного отсоса пыли в дизельных двигателях тракторного типа [3]. Из анализа всех приведенных источников можно сделать вывод о высокой эффективности использования потенциала газодинамических процессов для осуществления эжекционной очистки воздуха. Использование энергии выхлопных газов предоставляет дополнительные возможности для осуществления эжекционного отсоса пыли, так как не требует наличия дополнительных устройств, для создания газовых потоков. В литературе широко изложены теоретические основы газодинамических процессов [8–9], но недостаточно внимания уделено влиянию температурных процессов на характеристики эжекционного отсоса и обратному влиянию эжекционного отсоса пыли выхлопными газами

на условия работы двигателя. Нет информации о параметрах эжекционного отсоса при условии расположения эжектора непосредственно в глушителе двигателя.

Основная цель данной работы — проиллюстрировать моделирование эжекционного отсоса пыли выхлопными газами в специализированном пакете, проведено сравнение результатов моделирования с натурным экспериментом. Путем пошаговой оптимизации методом последовательных приближений, на основе анализа конструкции подобраны геометрические параметры эжектора, расположенного в глушителе двигателя, обеспечивающие оптимальный отсос пыли, оценено обратное влияние эжекционного отсоса на условия работы двигателя. Впервые проиллюстрировано в виде научной публикации использование эжекционного отсоса пыли выхлопными газами на серийно выпускаемой самоходной уборочной сельскохозяйственной машине.

**Постановка задачи.** Потребность в повышении эффективности эжекционного отсоса возникла в связи с установкой на зерноуборочный комбайн КЗС-1624-1, выпускаемый ОАО «Гомсельмаш», двигателя другой конструкции с глушителем, имеющим иную конфигурацию. Поэтому эффективность эжекционного отсоса для ранее используемой конструкции эжектора резко снизилась.

Для исследования причин снижения эффективности и поисков путей решения возникшей научно-технической проблемы было проведено моделирование эжекционного отсоса воздуха из предочистителя воздухоочистителя эжектором, установленным в 1-й глушитель двигателя.

Для расчета использовалась система вычислительной гидродинамики Ansys CFX с использованием метода конечных объемов для численного решения дифференциальных уравнений Навье–Стокса, описывающих движение текучей среды.

Моделирование эжекционного отсоса воздуха проводилось для трех вариантов площади сечения эжектора, с открытым и закрытым входом в патрубок низкого давления.

На рисунке 1 показана проточная область с граничными условиями и указанием расположения мест экспериментальных и расчетных из-

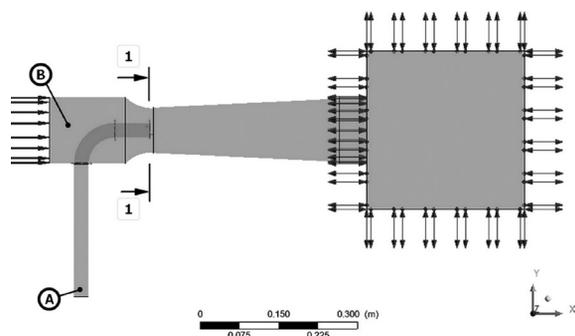


Рисунок 1 — Проточная область с граничными условиями и указанием зон замеров

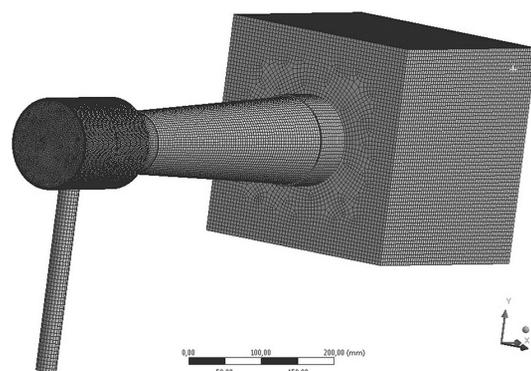


Рисунок 2 — Конечно-элементная сетка

мерений относительного давления (зоны А и В), а также сечение 1-1, по которому производится сужение эжектора.

В качестве модели турбулентного течения как наиболее подходящей для решения реальных инженерных задач выбрана  $k$ - $\epsilon$  модель с двумя дифференциальными уравнениями: кинетической энергии турбулентности и транспорта диссипации турбулентности.

Модель теплопереноса: Total Energy (учитывается сжимаемость рабочей среды, решаются уравнения теплопереноса).

На вход в проточную область, заполненную Air Ideal Gas, подается смесь газов, по составу близкая к выхлопным газам дизельных двигателей ( $\text{CO}_2$  — 10%,  $\text{H}_2\text{O}$  (пары) — 5%,  $\text{O}_2$  — 10%,  $\text{N}_2$  — 75%), с плотностью  $1,19 \text{ кг/м}^3$  при температуре  $20^\circ\text{C}$ . Температура выхлопных газов в моделируемой зоне глушителя составляет  $300^\circ\text{C}$ . Скорость воздушного потока на входе рассчитана по расходу выхлопных газов двигателя.

По стенке патрубка низкого давления, контактирующей с выхлопными газами, с помощью Domain Interface описаны граничные условия с теплопереносом, соответствующие стальной стенке толщиной 2 мм.

На границе выхода из расчетной области относительное давление  $p$  составляет 0 Па.

На геометрической модели проточной области построена конечно-элементная сетка (рисунок 2) с призматическим пограничным слоем и с уменьшением размеров элемента в области стенок для получения более качественной картины течения [10].

**Результаты исследования.** В таблице 1 приведены данные экспериментальных измерений

Таблица 1 — Среднее арифметическое относительное давление в закрытом патрубке низкого давления (зона А) по результатам экспериментальных замеров, Па (мм вод. ст.)

Поперечное сечение эжектора (1-1)		
Исходное сечение 4970 мм <sup>2</sup>	Уменьшенное до 3685 мм <sup>2</sup>	Уменьшенное до 2600 мм <sup>2</sup>
−4315 (−440)	−8532 (−870)	−18 338 (−1870)

Таблица 2 – Результаты моделирования эжекционного отсоса

Параметры	Скорость выхлопных газов на входе в эжектор, м/с (расход выхлопных газов, м <sup>3</sup> /мин)	Зона замеров			
		А		В	
		Состояние патрубка низкого давления			
		закр.	откр.	закр.	откр.
Площадь поперечного сечения 1-1 $S = 4970 \text{ мм}^2$					
Относительное давление, Па	13,4 (10)	-255	-138	52	77
Массовый расход, кг/с		—	0,011	0,10	0,10
Относительное давление, Па	26,7 (20)	-1040	-596	205	300
Массовый расход, кг/с		—	0,023	0,20	0,20
Относительное давление, Па	40 (30)	-2390	-1405	450	672
Массовый расход, кг/с		—	0,035	0,30	0,30
Относительное давление, Па	53,5 (40)	-4419	-2642	840	1227
Массовый расход, кг/с		—	0,048	0,41	0,41
Площадь поперечного сечения 1-1 $S = 3685 \text{ мм}^2$					
Относительное давление, Па	13,4 (10)	-475	-282	102	155
Массовый расход, кг/с		—	0,016	0,10	0,10
Относительное давление, Па	26,7 (20)	-1950	-1218	410	625
Массовый расход, кг/с		—	0,033	0,20	0,20
Относительное давление, Па	40 (30)	-4545	-2920	945	1440
Массовый расход, кг/с		—	0,050	0,31	0,31
Относительное давление, Па	53,5 (40)	-8645	-5653	1835	2752
Массовый расход, кг/с		—	0,069	0,41	0,42
Площадь поперечного сечения 1-1 $S = 2600 \text{ мм}^2$					
Относительное давление, Па	13,4 (10)	-954	-610	240	360
Массовый расход, кг/с		—	0,023	0,10	0,10
Относительное давление, Па	26,7 (20)	-3985	-2696	1023	1475
Массовый расход, кг/с		—	0,048	0,20	0,20
Относительное давление, Па	40 (30)	-9705	-6726	2730	3685
Массовый расход, кг/с		—	0,076	0,31	0,31
Относительное давление, Па	53,5 (40)	-21453	-15050	7840	8930
Массовый расход, кг/с		—	0,11	0,44	0,44

относительного давления в закрытом патрубке низкого давления (зона А) для трех вариантов сечения эжектора при полной нагрузке двигателя, что по информации завода изготовителя соответствует расходу выхлопных газов 40 м<sup>3</sup>/мин.

В таблице 2 сведены результаты моделирования эжекционного отсоса для трех вариантов площади поперечного сечения.

В таблицах 3 и 4 приведены расчетные поля распределения относительного давления и расчетные поля распределения скоростей газового потока в проточной области по средней вертикальной плоскости для различных сечений эжектора с открытым и закрытым патрубком низкого давления при расходе выхлопных газов 40 м<sup>3</sup>/мин.

По результатам численного моделирования и экспериментальных замеров с помощью интерполяционного кубического полинома были построены зависимости, показанные на рисунках 3–6.

На рисунке 3 представлены зависимости относительного давления в патрубке низкого давления от площади поперечного сечения эжектора, построенные по результатам экспериментальных замеров и численного моделирования.

Метрологические характеристики результатов замеров относительного давления в патрубке низкого давления представлены в таблице 5.

Результаты статической обработки проведенных опытов свидетельствуют о том, что разброс значений с доверительной вероятностью 95% не превышает  $\pm 5\%$ .

Относительные отклонения значений относительного давления в патрубке низкого давления по результатам расчета от среднееарифметических результатов замеров для поперечных сечений 3685 мм<sup>2</sup> и 4970 мм<sup>2</sup> составляют 1,32% и 2,41% соответственно, что находится в пределах допустимой погрешности. Значительное несоответствие значения относительного давления наблюдается при минимальной площади поперечного сечения эжектора 2600 мм<sup>2</sup>. Относительное отклонение составляет 16,99%.

Причиной значительного несоответствия результатов замера относительного давления с результатами расчета для площади поперечного сечения эжектора 2600 мм<sup>2</sup> является то, что при уменьшении поперечного сечения эжектора относительное давление на входе в эжектор в точке В повышается (см рисунки 5, 6). Это давление является проти-

Таблица 3 — Результаты моделирования эжекционного отсоса эжектора с закрытым патрубком низкого давления

Расчетные поля распределения относительного давления, Па	Расчетные поля распределения скоростей газового потока, м/с
Площадь поперечного сечения 1-1 $S = 4970 \text{ мм}^2$	
Площадь поперечного сечения 1-1 $S = 2600 \text{ мм}^2$	

Таблица 4 — Результаты моделирования эжекционного отсоса эжектора с открытым патрубком низкого давления

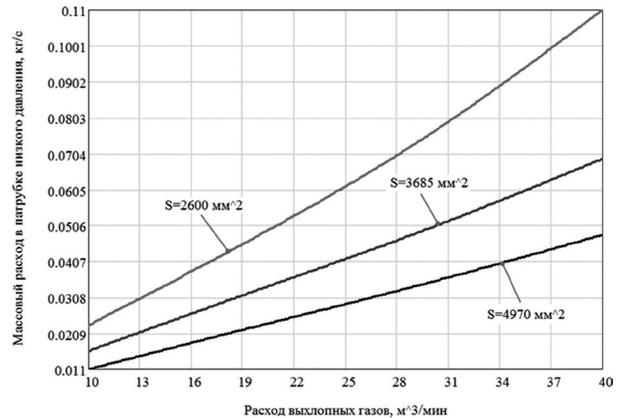
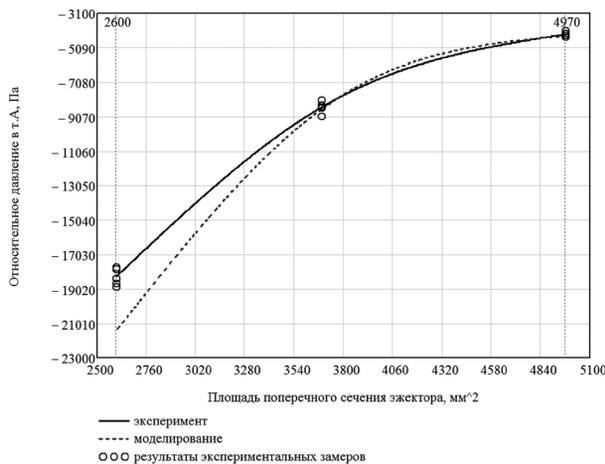
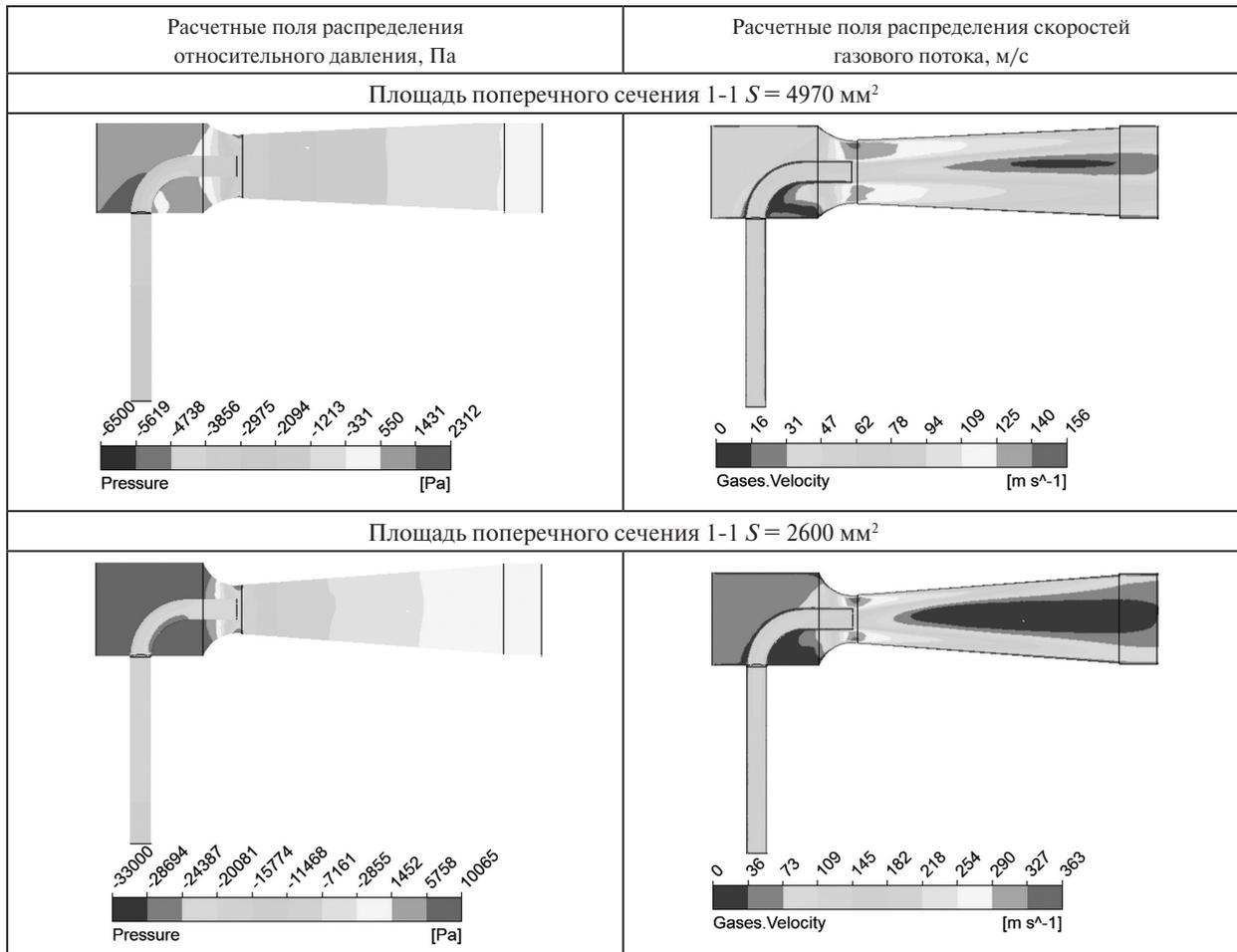


Рисунок 3 — Зависимости относительного давления в патрубке низкого давления от площади поперечного сечения эжектора

Рисунок 4 — Зависимости массового расхода в патрубке низкого давления от расхода выхлопных газов

вода давлением относительно потока выхлопных газов, что привело к уменьшению расхода выхлопных газов коллектора двигателя за счет падения его мощности, и не учтено в численном моделировании.

На рисунке 4 представлены зависимости массового расхода в патрубке низкого давления от расхода выхлопных газов.

На рисунках 5, 6 представлены зависимости относительного давления в точке A и точке B

от расхода выхлопных газов для различных сечений эжектора при закрытом и открытом патрубке низкого давления.

Из рисунков 3–6 следует, что уменьшение поперечного сечения эжектора приводит к повышению давления разрежения и расхода через сечение патрубка низкого давления, но ведет к увеличению противодействия потоку выхлопных газов.

**Заключение.** Разработана методика моделирования процесса эжекторного отсоса пыли

Таблица 5 — Метрологические характеристики результатов замеров

Площадь сечения, мм <sup>2</sup>	$f$	$\bar{X}$	$S$	$P, \%$	$t(P, f)$	$\Delta X$	$E, \%$
4970	5	-4315	128,3	95	2,776	±178,0	±4,1
3685	5	-8532	306,0	95	2,776	±424,8	±4,9
2600	5	-18338	434,0	95	2,776	±602,2	±3,3

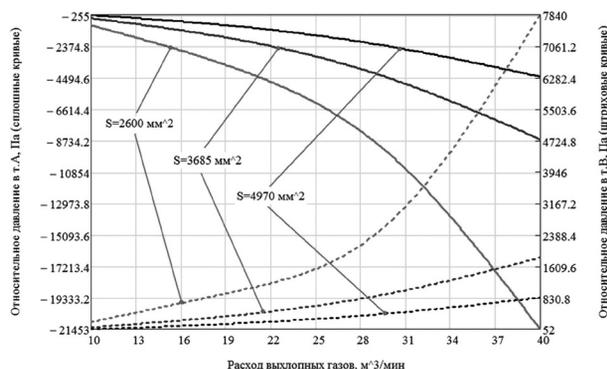


Рисунок 5 — Зависимости относительного давления в точке А и точке В от расхода выхлопных газов для различных сечений эжектора при закрытом патрубке низкого давления

выхлопными газами с использованием эжектора, установленного в глушителе двигателя самоходной уборочной сельскохозяйственной машины.

Проведено сравнение результатов моделирования и экспериментальных измерений. Сделан вывод, что значительное расхождение результатов моделирования с результатами экспериментальных измерений при минимальной площади поперечного проходного сечения эжектора объясняется повышенным противодавлением выхлопных газов в выхлопном коллекторе, что приводит к снижению мощности двигателя. Данное расхождение является индикатором и сигнализирует о нахождении системы в неблагоприятной зоне и позволяет наложить обоснованное ограничение на поиск зоны оптимальности конструкции эжектора.

В других зонах расхождение результатов моделирования с результатами эксперимента не превышает 2,5%, что позволяет говорить о высокой адекватности расчета и использовать результаты расчета при выборе конструкции эжектора.

В результате моделирования получены зависимости исследуемых величин от изменяемых параметров, которые представлены в виде графиков.

Проведенные исследования позволили осуществить выбор оптимальной конструкции эжектора, что в свою очередь дало возможность повысить эффективность эжекционного отсоса пыли выхлопными газами до требуемой величины без ухудшения условий работы двигателя.

Приведенная методика внедрена и успешно используется в ОАО «Гомсельмаш» при проекти-

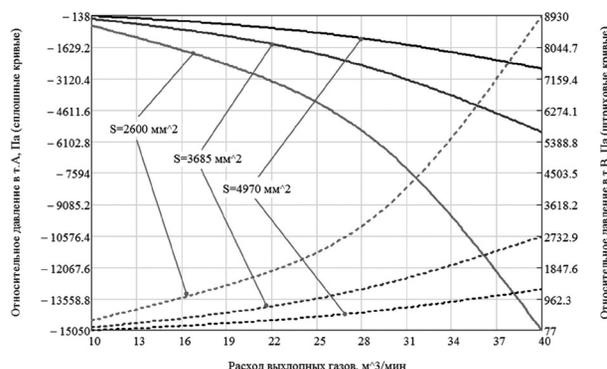


Рисунок 6 — Зависимости относительного давления в точке А и точке В от расхода выхлопных газов для различных сечений эжектора при открытом патрубке низкого давления

ровании самоходных сельскохозяйственных уборочных машин.

#### Список литературы

1. Тимошенко, Н.С. Моделирование вытяжного воздуховода для дуговых сталеплавильных печей / Н.С. Тимошенко, А.Н. Семко // Современная наука: сб. науч. статей / Донецкий нац. ун-т. — Донецк, 2012. — № 2(10).
2. Асламова, В.С. Процесс сепарации в высокопроизводительных прямоточных циклонах и методы их расчета: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.17.08 / В.С. Асламова; Томский политехн. ун-т. — Томск, 2009. — 40 с.
3. Исследование струйного эжектора удаления пыли из воздухоочистителя выхлопными газами в транспортном дизеле / С.А. Алехин [и др.] // Авиационно-космическая техника и технологии. — 2009. — № 8(65).
4. К вопросу выбора эжектора системы очистки воздуха танков с двухтактными двигателями / В.Ф. Климов [и др.] // Интегрированные технологии и энергосбережение. — 2014. — № 3.
5. Успенский, В.А. Струйные вакуумные насосы / В.А. Успенский, Ю.М. Кузнецов. — М.: Машиностроение, 1973. — 144 с.
6. Основы гидравлики и аэродинамики / В.И. Калицун [и др.]. — М.: Стройиздат, 2001. — 256 с.
7. Соколов, Е.Я. Струйные аппараты / Е.Я. Соколов, Н.М. Зингер. — М.: Энергоиздат, 1989. — 352 с.
8. Современные автомобильные воздухоочистители / М.С. Корнев [и др.]; под ред. М.С. Корнева. — М.: НИИНАВТОПРОМ, 1972. — 62 с.
9. Дейч, М.Е. Газодинамика: учеб. пособие для вузов / М.Е. Дейч, А.Е. Зарянкин. — М.: Энергоатомиздат, 1984. — 384 с.
10. Верхотуркин, Е.Ю. Интерфейс и генерирование сетки в ANSYS Workbench: учеб. пособие по курсу «Геометрическое моделирование в САПР» / Е.Ю. Верхотуркин, В.Н. Пашенко, В.Б. Пясецкий. — М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2013. — 63 с.
11. Основы работы в ANSYS 17 / Н.Н. Федорова [и др.]. — М.: ДМК Пресс, 2017. — 210 с.

KALINOUSKI Alexander A., Mas. Techn. Sc.

Design Engineer<sup>1</sup>

CHUPRYNIN Yuriy V., Ph. D. in Eng.

Head of the Design and Research Department of Dynamics, Strength, Analytical Reliability<sup>1</sup>

E-mail: y.chuprynin@mail.ru

NOVIKOV Alexander A.

Deputy Director General for Technical Affairs — Principal Engineer<sup>1</sup>

E-mail: 293592466t@mail.ru

<sup>1</sup>OJSC “Gomselmash”, Gomel, Republic of Belarus

Received 15 March 2018.

## MODELING AND EVALUATION OF EFFICIENCY OF THE DUST EJECTION SUCTION BY EXHAUST GASES IN THE AGRICULTURAL HARVESTER DAMPER

*A methodology and solid-state modeling results of the dust ejection suction process from the engine air inlet with exhaust gases by means of ejector, installed in the self-moving agricultural harvester damper, are given. The results of modeling are compared with the results of experimental researches; conclusions about gained data divergence reasons in some investigated parameters ranges are drawn. Investigated values dependences on changeable parameters are gained. Optimal ejector geometrics providing effective dust suction without engine work conditions deterioration are selected. Recommendations for ejection suction systems engineering are produced at self-moving agricultural harvesters' development which is successfully used at OJSC “Gomselmash”.*

**Keywords:** ejector, damper, exhaust gases, differential pressure, mass flow rate, area of passage

### References

1. Timoshenko N.S., Semko A.N. Modelirovanie vytyazhnogo vozdukhovoda dlya dugovykh staleplavilnykh pechey [An exhaust air duct modeling for arc steel melting furnaces]. *Sbornik nauchnykh statey “Sovremennaya nauka”* [Scientific articles collection “Modern science”], 2012, no. 2(10), pp. 10–15.
2. Aslamova V.S. *Protsess separatsii v vysokoproizvoditelnykh pryamotoknykh tsiklonakh i metody ikh rascheta. Diss. dokt. tekhn. nauk* [Separation process in high-duty direct-flow cyclones and methods of their calculation. Extended Abstract of D. Sc. Thesis]. Tomsk, 2009. 40 p.
3. Alekhin S.A., Vasilev V.S., Gerasimenko V.P., Opalev V.A. Issledovanie struynogo ezhektora udaleniya pyli iz vozdukhoochistitelya vykhlopnymi gazami v transportnom dizele [Research of dust removal jet ejector from an air cleaner with exhaust gases in the transport diesel]. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologii* [Aerospace engineering and technologies], 2009, no. 8(65), pp. 96–101.
4. Klimov V.F., Magueramov L.K., Mihaylov V.V., Shipulin A.A. K voprosu vybora ezhektora sistemy ochestki vozdukh tankov s dvukhtaktnymi dvigatelyami [To the question of choice of air purification tanks with two-cycle engines in ejector system]. *Integririvannyye tekhnologii i energosberezhenie* [Integrated Technologies and Energy Conservation], 2014, no. 3, pp. 125–129.
5. Uspenskiy V.A., Kuznetsov Yu.M. *Struynnye vakuumnnye nasosy* [Ejectors]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1973. 144 p.
6. Kalitsun V.I., Drozdov E.V., Komarov A.S., Chizhik K.I. *Osnovy gidravliki i aerodinamiki* [Fundamental hydraulics and aerodynamics]. Moscow, Stroyizdat Publ., 2001. 256 p.
7. Sokolov E.Ya., Zinger N.M. *Struynnye apparaty* [Jet apparatuses]. Moscow, Energoizdat Publ., 1989. 352 p.
8. Kornev M.S. *Sovremennyye avtomobilnye vozdukhoochistiteli* [Modern automobile air cleaners]. Moscow, Research Institute of Information on the Automotive Industry Publ., 1972. 62 p.
9. Deych M.Ye., Zaryankin A.E. *Gidrogazodinamika: Ucheb. posobie dlya vuzov* [Hydraulic gas dynamics: Tutorial for institutes of higher education]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1984. 384 p.
10. Verkhoturkin Ye.Yu., Pashchenko V.N., Pyasetskiy V.B. *Interfeys i generirovanie setki v ANSYS Workbench: ucheb. posobie po kursu “Geometricheskoe modelirovanie v SAPR”* [Interface and gridding in ANSYS Workbench: Tutorial, according to the course “Geometrical simulation in CAD”]. Moscow, MSTU Publishing house n.a. N.E. Bauman, 2013. 63 p.
11. Fedorova N.N., Valger S.A., Danilov M.N., Zakharova Yu.V. *Osnovy raboty v ANSYS 17* [Basic operation in ANSYS 17]. Moscow, DMK Press Publ., 2017. 210 p.