

УДК 625.84: 625.717:539.422.5:623.687

РАЗВИТИЕ ГИДРОСТРУЙНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ РЕМОНТА ЖЕСТКИХ ПОКРЫТИЙ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ И АЭРОДРОМОВ

Д-р техн. наук, профессор **Д.Е. Барабаш**,
канд. техн. наук **А.П. Лапшин**,
канд. техн. наук **А.В. Бураков**
(Военно-воздушная академия имени профессора
Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина)
Контактная информация: barabash60170@yandex.ru;
schetchik777@mail.ru

В последние годы наблюдается возрастающая потребность в проведении оперативных ремонтов жестких покрытий автомобильных дорог и аэродромов. Это обусловлено тем, что значительная часть существующих дорог и аэродромов с жесткими покрытиями расположена в регионах России с различным климатом и условиями эксплуатации. В статье представлены результаты исследования гидроструйных технологий, применяемых для ремонта цементобетонных покрытий автомобильных дорог и аэродромов государственной авиации.

Ключевые слова: гидрорезание, жесткие покрытия, технология ремонта, математическое моделирование, сопло.

Анализ специалистами эксплуатационного состояния жестких покрытий автомобильных дорог и аэродромов, а также измерение их несущей способности показали, что в большинстве случаев при достаточно высокой несущей способности состояние поверхности самого покрытия имеет низкие показатели, что, в свою очередь, вынуждает проводить ремонтно-восстановительные работы [1]. В настоящее время, с учетом выбора рациональных и экономичных подходов к ремонту и требований нормативных документов, специалистами применяется такой способ ремонта, как устройство ремонтного слоя покрытия на локальных участках повреждения из материалов на основе сухих бетонных смесей [2, 3] или асфальтобетонов с улучшенными физико-механическими характеристиками. Однако на стадии производства подготовительных работ, связанных с удалением поврежденных слоев жестких покрытий до глубины 10 см и более, возникает ряд недостатков. При этом анализ технологических операций, применения машин и механизмов, которые используются при удалении поврежденных участков жестких покрытий, дает возможность сделать вывод о том, что механические способы удаления поврежденных покрытий с

использованием фрез, перфораторов, отбойных молотков, металлических щеток, бетоноломных установок и др. имеют ряд недостатков:

- значительные материальные затраты, включая затраты на приобретение фрез, как по разрезанию материала покрытий, так и по снятию части его верхнего слоя;
- высокая трудоемкость удаления слоев толщиной менее 5-7 мм;
- низкая производительность;
- нарушение физико-механических свойств и конструктивных особенностей аэродромного или дорожного покрытий из-за большой амплитуды вибрации и касательных напряжений в зоне снятия материала покрытий механическим способом.

В частности, растрескивание нижних слоев покрытия и повреждение его внутреннего каркаса значительно снижает прочность сцепления на отрыв применяемых ремонтных смесей. Все это в совокупности обуславливает увеличение энергозатрат, времени и стоимости ремонтных работ, и самое главное – ухудшает их качество. Таким образом, ремонтные организации нуждаются в совершенно новых технологиях ремонта жестких покрытий автомобильных дорог и аэродромов. Одной из таких технологий является технология гидроудаления материала покрытия посредством применения водоструйных установок высокого и сверхвысокого давления (**рис. 1**), режущим инструментом которых является кинетическая энергия водяной струи сверхзвуковой скорости, истекающей под большим давлением из отверстия малого диаметра – струеформирующего сопла конфузного типа.



Рис. 1. Применение гидроустановок высокого давления для удаления поврежденных слоев цементобетонных покрытий

Сравнивая данную технологию гидроудаления дорожных и аэродромных покрытий с механическим способом, применяемым ремонтными организациями, необходимо отметить ряд ее преимуществ:

- генерируемое в процессе резания тепло практически мгновенно уносится водой, в результате чего не происходит заметного повышения температуры в зоне реза материала;
- небольшие касательные усилия до 100 Н в зоне реза исключают появление больших касательных напряжений и деформаций, тем самым сохраняя физико-механические свойства материала существующего покрытия [4];
- формируемый микрорельеф ремонтируемой поверхности покрытия после воздействия гидроструи значительно увеличивает прочность сцепления на отрыв ремонтных материалов;
- большая кинетическая энергия гидроструи при рабочем давлении насоса гидроустановки в 30 МПа уже позволяет производить удаление верхних слоев покрытия – это может существенно увеличить объем выполняемых работ на более мощных режимах реза;
- данная технология эффективно применяется в роботизированных комплексах (**рис. 2**) благодаря малой величине инерционных сил менее 40 Н, действующих на инструмент, и небольшому весу подвижных элементов установки;
- гидроудаление верхних слоев поврежденных участков покрытий позволяет не разрушать внутренний каркас цемента-или асфальтобетона, тем самым обеспечивая сохранение прочностных характеристик материала;
- низкая стоимость расходных материалов;
- отсутствие вибраций, нагрева и искрообразования в зоне реза обеспечивает абсолютную пожаровзрывобезопасность при производстве ремонтных работ.

Таким образом, применение ресурсосберегающей технологии гидроудаления поврежденных слоев жестких покрытий аэродромов и автомобильных дорог позволит обеспечить высокую производительность и качество подготовительных работ, осуществляемых при их ремонте, а понимание физических процессов, которые происходят во внутренней структуре высокоскоростной гидроструи, используемой в данной технологии, будет содействовать созданию комплексной модели по выбору рациональных параметров гидрореза с заданными производственными ограничениями.

Основными функциональными элементами технологической системы гидрорезания являются элементы, обеспечивающие преобразова-

ние гидростатического давления рабочей жидкости в высокоскоростной напор. Структурная схема работы гидросистемы высокого давления представлена на **рис. 2**.

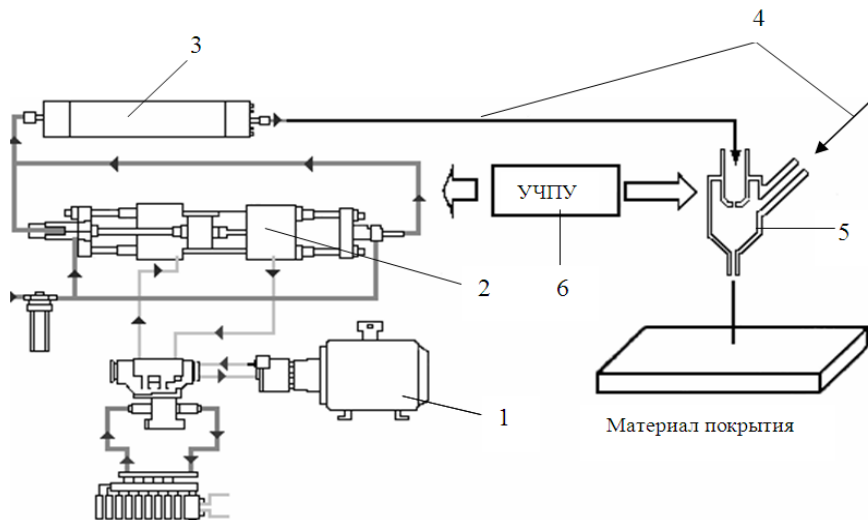


Рис. 2. Схема работы гидросистемы высокого давления:

- 1) гидростанция низкого давления; 2) блок высокого давления с мультипликатором (гидронасос); 3) ресивер; 4) подводящие каналы жидкости; 5) сопловый аппарат; 6) исполнительное устройство и устройство управления

Расчетная схема гидрорезания поверхности цементобетонного или асфальтобетонного покрытия представлена на **рис. 3**.

Анализ научных исследований, проведенный в [5, 6], показал, что результат процесса гидрорезания твердых материалов, в том числе цементобетонных различных марок, зависит от большого числа параметров (**рис. 3**), а именно:

- гидродинамических параметров: давление потока жидкости (воды) в подводящем гидроканале перед сопловым устройством P_0 ;
- геометрических параметров: форма образующей поверхности внутреннего профиля струеформирующего соплового устройства гидрорежущего инструмента $f(x)$; диаметр входного и выходного отверстий соплового устройства D_1 и D_2 ;
- физико-механических и структурных характеристик цементобетонного аэродромного покрытия: пределы прочности при различных видах нагружения, в частности, при сжатии и растяжении σ_c и σ_p ; реологические параметры, например, модуль Юнга E

- и коэффициент Пуассона ν ; пористость; удельная поверхность; гранулометрический состав твердого заполнителя цементобетонной смеси и другие;
- параметров производительности: скорость подачи струи и др.

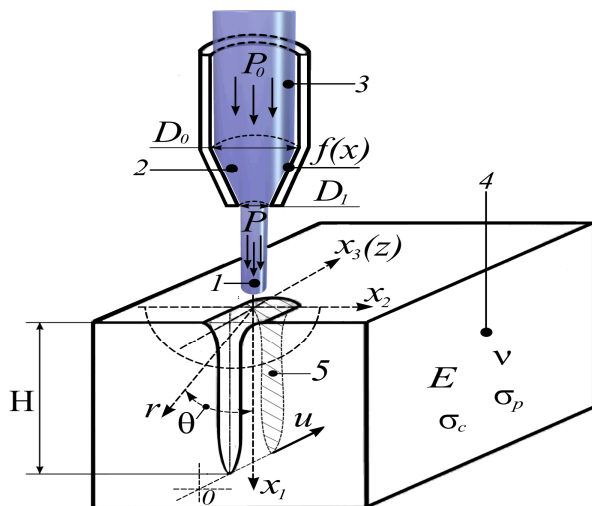


Рис. 3. Расчетная схема гидрорезания поверхности цементобетонного или асфальтобетонного покрытия:

- 1) высокоскоростная жидкостная струя; 2) сопловое устройство гидрорежущего инструмента; 3) подводящий гидроканал высокого давления; 4) материал покрытия; 5) контур фронта гидрорезания

Для практической оценки параметров гидрорезания жестких покрытий автомобильных дорог и аэродромов предложена следующая зависимость [7]:

$$H = 0,00134 \frac{P_0 D_2}{\sigma_c u^{0,331}}, \quad (1)$$

где

H – глубина гидрорезания, м;

P_0 – давление гидроустановки, МПа;

D_2 – диаметр струеформирующего соплового устройства гидрорежущего инструмента установки, мм;

u – скорость подачи гидроструи относительно поверхности покрытия, м/с.

Для исследования параметров, указанных в (1), было введено следующее ограничение: для P_0 : 100-350 МПа.

С учетом предложенных ограничений были получены графические зависимости глубины гидрорезания H для различных комбинаций параметров гидрорезания (рис. 4-7).

Комплексная оценка параметров (1) показала, что глубина гидрорезания H жестких покрытий прямо пропорционально зависит от давления гидроустановки P_0 и увеличивается с возрастанием давления на всем интервале его значений. Это связано с увеличением давления на поверхности контакта гидроструи с покрытием и ростом нормальных напряжений в области гидрорезания (рис. 4 а).

Увеличение предела прочности материала покрытия с 30 до 60 МПа вызывает снижение глубины гидрорезания. Так, при $P_0 = 200$ МПа для струеформирующего соплового устройства с выходным диаметром $D_2 = 0,0015$ м (при $u = 0, \dots, 0,2$ м/с) глубина гидрорезания уменьшается в 2 раза. Уменьшение глубины гидрорезания при увеличении предела прочности покрытия на сжатие обусловлено физико-механическими и структурными характеристиками материала (рис. 5 а).

Глубина гидрорезания покрытия H линейно зависит от отношения p_0 / σ_c и увеличивается с возрастанием данного отношения во всем интервале его значений. Так, увеличение безразмерных значений P_0 / σ_c с 3,3 до 5,8 вызывает увеличение глубины гидрорезания для струеформирующего соплового устройства с выходным диаметром $D_2 = 0,0015$ м (при $u = 0, \dots, 0,2$ м/с) в 1,75 раза (рис. 6 а).

Кроме того, глубина гидрорезания покрытия H уменьшается при увеличении предела прочности покрытия на одноосное сжатие по обратно пропорциональному закону для любых значений произведения параметров: $P_0 \cdot D_2$ (рис. 7 а).

На рис. 4 б-7 б отдельно показаны зависимости глубины гидрорезания покрытия H от скорости подачи u для рассмотренных вариантов.

Параметр, определяющий силовое воздействие гидроструи на поверхность покрытия в области гидрорезания, равен суммарному вкладу гидродинамического давления высокоскоростной гидроструи во внешнем слое жидкостного потока и давлению в пограничном слое на поверхности покрытия. Последние, в свою очередь, зависят от формы образующей поверхности внутреннего профиля струеформирующего соплового устройства гидросистемы.

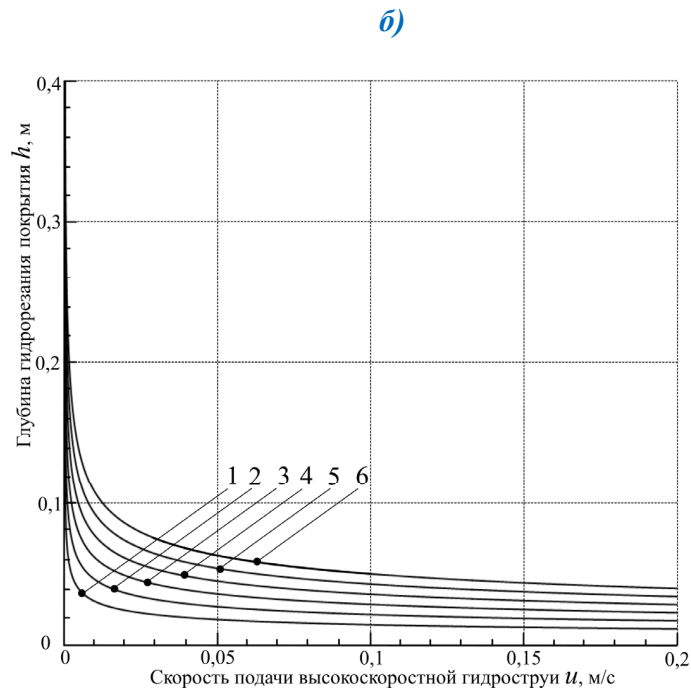
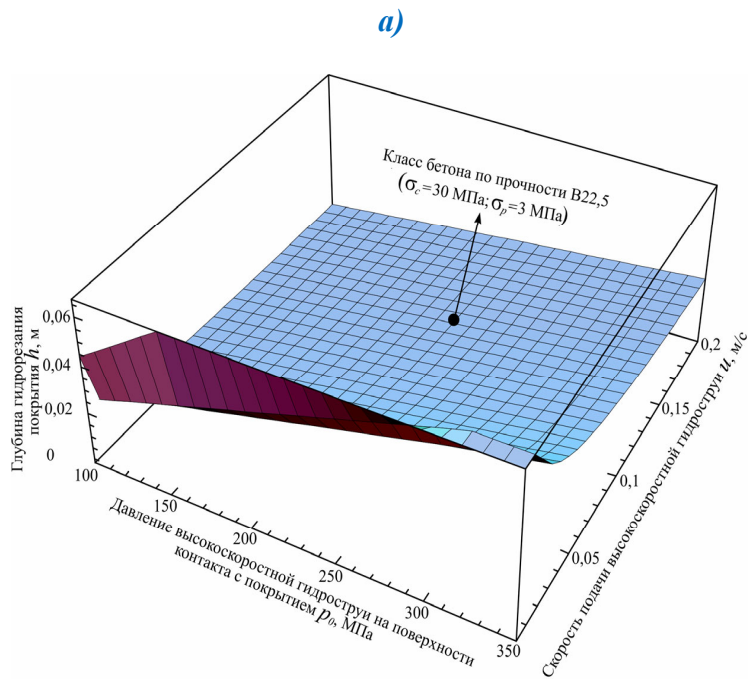


Рис. 4. Зависимости глубины гидрорезания покрытия H от P_0 и u для $\sigma_c = 30$ МПа; $\sigma_p = 3$ МПа; $D_2 = 0,0015$ м (при $p_0 = 100, \dots, 350$ МПа, при $u = 0, \dots, 0,2$ м/с):

а) комплексная оценка параметров; б) оценка зависимости H от u для заданных параметров (кривые 1, 2, 3, 4, 5, 6: соответствуют диапазону $P_0 = 100:50:350$ МПа)

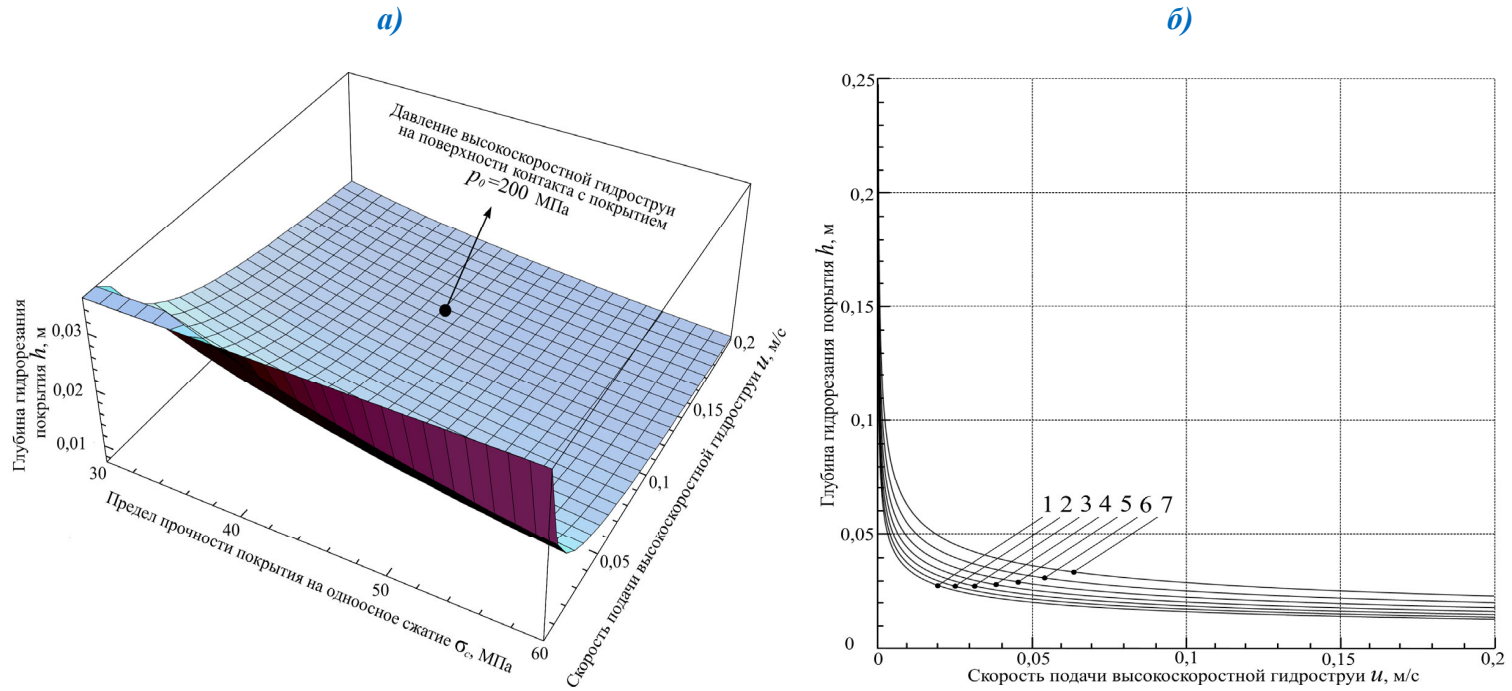
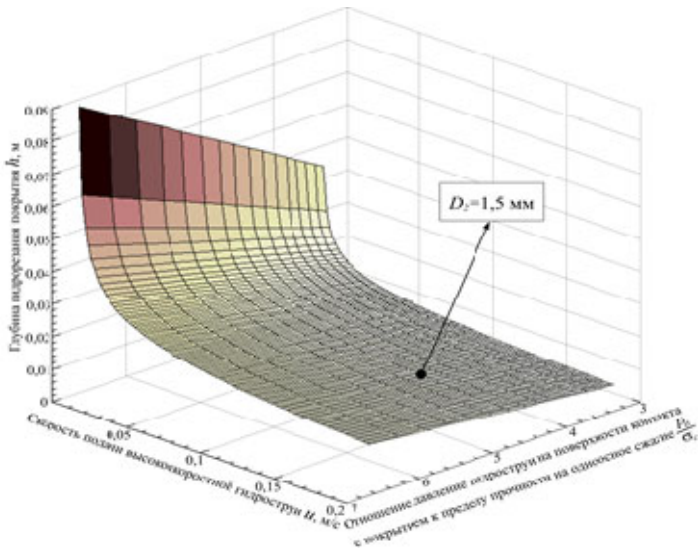


Рис. 5. Зависимость глубины гидрорезания покрытия H от σ_c и u для $P_0 = 200$ МПа, $D_2 = 0,0015$ м (при $\sigma_c = 30, \dots, 60$ МПа, при $u = 0,05, \dots, 0,2$ м/с):

а) комплексная оценка параметров; **б)** оценка зависимости H от u для заданных параметров (кривые 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7: соответствуют диапазону $\sigma_c = 30:5:60$ МПа)

а)



б)

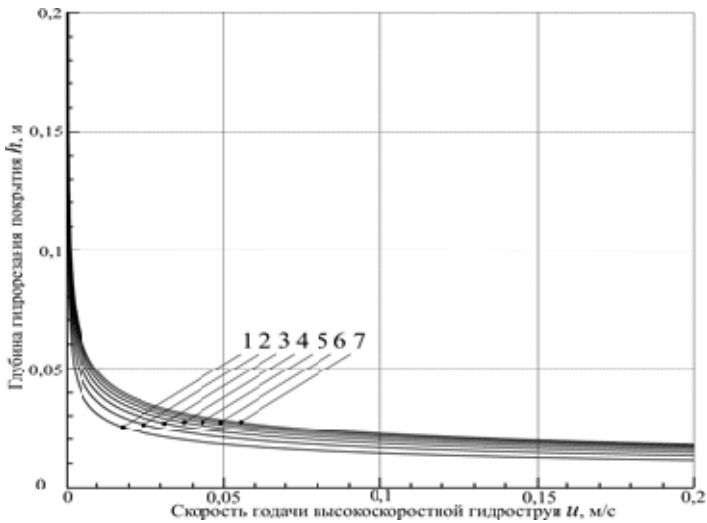
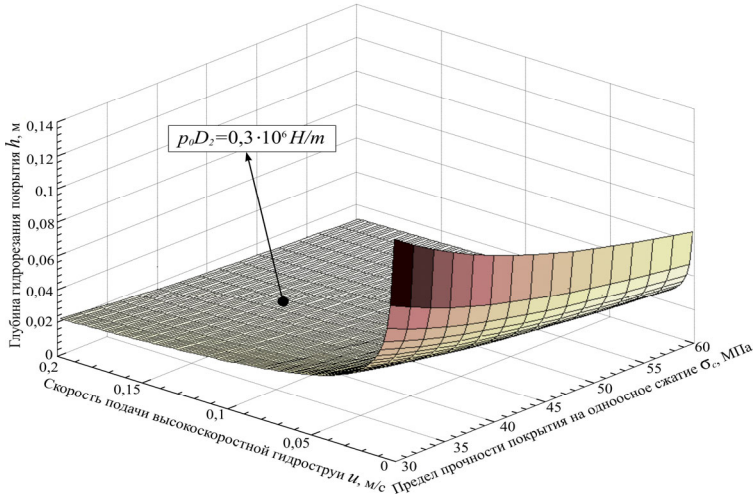


Рис. 6. Зависимость глубины гидроабразивного покрытия H от u и отношения P_0/σ_c для $D_2 = 0,0015$ м

(при $P_0/\sigma_c = 3, \dots, 7$; при $u = 0,05 \dots, 0,2$ м/с):

а) комплексная оценка параметров; б) оценка зависимости H от u для заданных параметров (кривые 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7: соответствуют диапазону $P_0/\sigma_c = 3:0,66:7$)

а)



б)

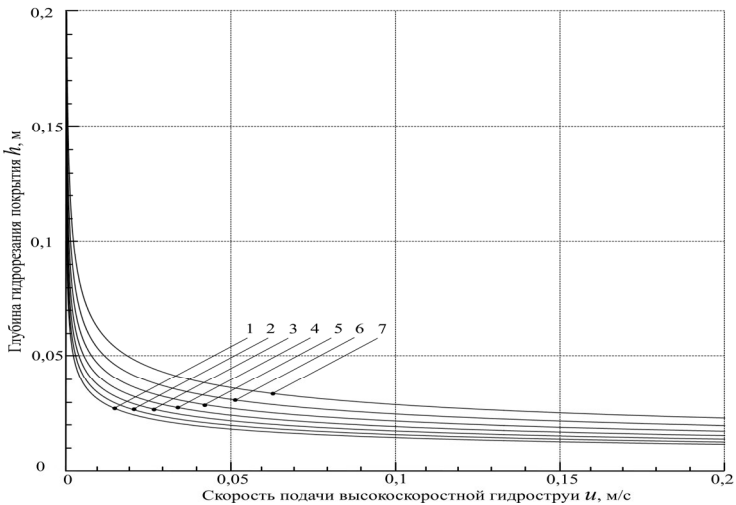


Рис. 7. Зависимость глубины гидрорезания покрытия H от σ_c и скорости подачи высокоскоростной гидроструи u для произведения $P_0 \cdot D_2 = 0,3 \cdot 10^6 \text{ Н/м}$ ($200 \text{ МПа} \cdot 0,0015 \text{ м}$) (при $\sigma_c = 30, \dots, 60 \text{ МПа}$, при $u = 0, \dots, 0,2 \text{ м/с}$):

а) комплексная оценка параметров;

б) оценка зависимости H от u для заданных параметров (кривые 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7: соответствуют диапазону $\sigma_c = 30:5:60 \text{ МПа}$)

Таблица 1

*Параметры исследуемой высоконапорной гидросистемы
конфузорного типа*

<i>Обозначение физической величины</i>	<i>Наименование</i>	<i>Мин. значение</i>	<i>Макс. значение</i>
D_1	Диаметр входного отверстия соплового устройства (конфузора)	5 мм	5 мм
D_2	Диаметр выходного отверстия конфузора	1,5 мм	1,7 мм
R_1	Радиус закругления входного участка цилиндрического канала конфузора	Условия для геометрической формы конфузора: 1) $R_1=R_2=3,938$ мм; 2) $2R_1=R_2=5,251=2,625$ мм; 3) $R_1=2R_2=2,625=5,251$ мм; 4) Коническое сопло с $D_1=5$ мм; $D_2=1,5$ мм.	
R_2	Радиус закругления выходного участка цилиндрического канала конфузора		
L_1	Длина конфузора	4,95 мм	4,95 мм
L_0	Длина входного цилиндра высоконапорной гидросистемы конфузорного типа	10 мм	10 мм
L_2	Длина выходного участка свободной струи	10 мм	10 мм
v_0	Скорость на входе в цилиндрический канал	50 м/с	60 м/с
H_2O	Рабочее тело (вода)		
μ	Коэффициент вязкости турбулизованной среды	10^{-3} кг/(м·с)	10^{-3} кг/(м·с)
ρ	Плотность турбулизованной среды.	10^3 кг/м ³	10^3 кг/м ³
p	Давление на выходе из конфузора.	0,1 МПа	0,1 МПа
Δp	Перепад давления в конфузоре	100 МПа	350 МПа

Для оценки влияния перехода гидростатического давления P_0 гидросистемы в скоростной напор по длине струеформирующего соплового устройства произведен расчет интегральных характеристик скорости высокоскоростной гидроструи на срезе сопла конфузورного типа сложной формы образующей поверхности внутреннего профиля с параметрами, указанными выше в табл. 1.

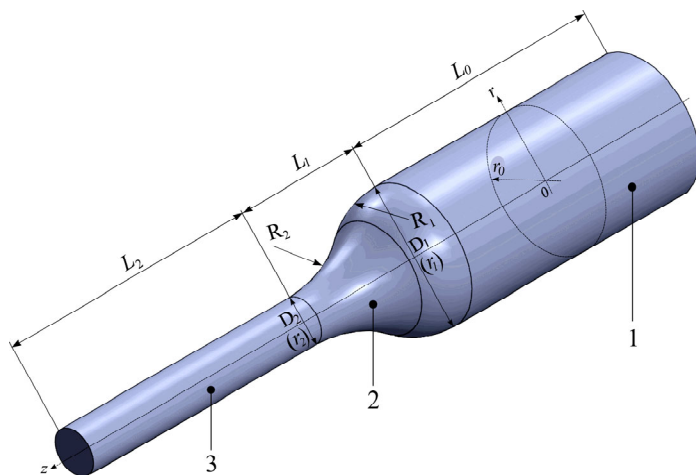


Рис. 8. Схема моделируемой гидросистемы:

1) подводящий цилиндрический канал; 2) струеформирующее сопловое устройство конфузорного типа; 3) прямолинейный участок круглой цилиндрической струи

Установлено, что для всех возможных значений параметров системы число Рейнольдса значительно превышает его критическое значение. Следовательно, в конфузоре будет иметь место развитое турбулентное течение. Сформулирована следующая концептуальная модель течения в конфузоре с различного типа боковой образующей поверхностью. Перед исследуемым участком находится канал, представляющий собой круговой цилиндр, диаметр которого равен входному диаметру конфузора. На входе в этот канал поступает однородный поток жидкости. Из конфузора истекает в воздушное пространство струя, имеющая на начальном участке также форму кругового цилиндра, диаметр которого равен выходному диаметру конфузора. Ограничиваемся условием того, что скорость на выходе из конфузора является величиной порядка 800 м/с, т.е. значительно меньше скорости звука в воде. Поэтому будем считать поток в конфузоре удовлетворяющим условию несжимаемости. Полагается также, что действием массовых

сил можно пренебречь, а процесс течения является стационарным и изотермическим.

С учетом сделанных предположений для описания турбулентного потока выбрана стандартная $k - \varepsilon$ модель турбулентности [8-10], которая в операторной форме может быть представлена в следующем виде:

– уравнение движения турбулентного потока:

$$\rho(\mathbf{v} \cdot \nabla) = \nabla \cdot \mathbf{P} \quad ; \quad (2)$$

– уравнение его неразрывности:

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = 0 \quad ; \quad (3)$$

– уравнение баланса кинетической энергии турбулентных пульсаций:

$$\mathbf{v} \cdot \nabla k = \nabla \cdot \left(\frac{\mu_{eff}}{\sigma_k} \nabla k \right) + G - \rho \varepsilon \quad ; \quad (4)$$

– уравнение баланса скорости диссипации кинетической энергии турбулентных пульсаций:

$$\mathbf{v} \cdot \nabla \varepsilon = \nabla \cdot \left(\frac{\mu_{eff}}{\sigma_\varepsilon} \nabla \varepsilon \right) + \frac{\varepsilon}{k} \cdot (C_1 G - C_2 \rho \varepsilon) \quad ; \quad (5)$$

где

$$\mathbf{v}(X, t) = \frac{1}{T} \int_{t+\frac{T}{2}}^{t+\frac{T}{2}} \mathbf{u}(X, \tau) d\tau \quad - \text{вектор осредненной по времени скорости;}$$

ρ – плотность турбулизованной среды;

$X = \{x_1, x_2, x_3\}$ – совокупность пространственных координат;

$\mathbf{u}(X, t)$ – вектор скорости турбулизованной среды;

T – постоянный период осреднения;

k – кинетическая энергия турбулентных пульсаций;

ε – скорость диссипации кинетической энергии турбулентных пульсаций;

$\mu_{eff} = \mu + \mu_t$ – коэффициент эффективной турбулентной вязкости;

μ – коэффициент молекулярной вязкости турбулизованной среды;

μ_t – молекулярная вязкость турбулентного потока [10];

$G = \mathbf{P} \cdot (\nabla \mathbf{v})$ – диссипативная функция турбулентного потока, записываемая через сдвиговые компоненты тензора напряжений \mathbf{P} и вектор осредненной скорости \mathbf{v} .

Замыкание системы уравнений (2-5) производится с помощью реологического уравнения:

$$\mathbf{P} = -p\mathbf{I} + 2\mu_{eff}\mathbf{E} \quad (6)$$

и формулы Прандтля – Колмогорова [10]:

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (7)$$

Для выполнения условия единственности решения поставленной задачи были заданы начальные и граничные условия на всех частях поверхности, ограничивающей область течения в конфузоре струеформирующего устройства (рис. 8).

Сформулированные уравнения математической модели (2-6), дополненные начальными и граничными условиями, позволили провести исследования основных закономерностей и особенностей течения воды в сопловых устройствах каналов гидросистем конфузорного типа в зависимости от формы их образующей поверхности, различных геометрических параметров и величины приложенного перепада давления.

Результаты компьютерного 3D-моделирования физического процесса формирования высокоскоростной гидроструи в соплах с различной геометрией внутреннего профиля представлены на рис. 9-12.

Установлено, что наиболее эффективным является внутренний профиль сопла с образующей двоякой кривизны, рис. 9 б, для которого радиус образующей входного участка в 2 раза меньше радиуса образующей выходного участка: $R_1=2,625$ мм; $R_2=5,251$ мм. Скорость гидроструи, сформированной в данном сопле, выше скорости гидроструи, сформированной в коническом сопле, чаще всего используемом при гидрорезании твердых поверхностей на 103 м/с. При этом режущий потенциал высокоскоростной гидроструи механизма гидрорезания возрастает на 34 %.

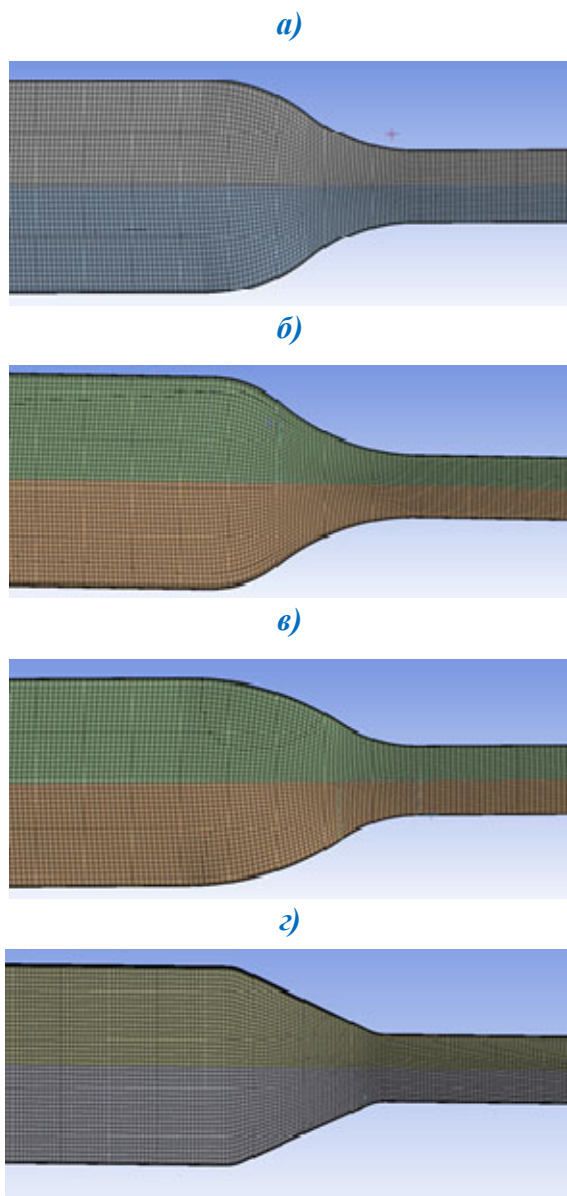
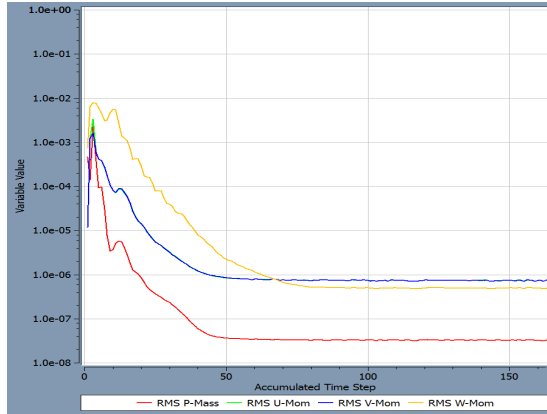


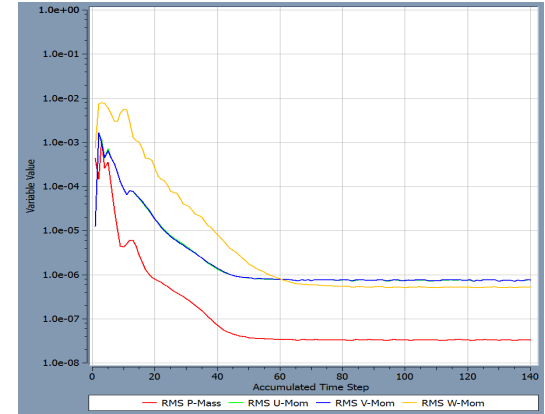
Рис. 9. Сеточные области для расчета сопел с разной геометрией внутреннего профиля:

- а) сопло с равными радиусами образующих входного и выходного участков ($R_1 = R_2 = 3,938$ мм); б) сопло с радиусом образующей входного участка в 2 раза меньше радиуса образующей выходного участка ($R_1 = 2,625$ мм; $R_2 = 5,251$ мм); в) сопло с радиусом образующей входного участка в 2 раза больше радиуса, образующей выходного участка ($R_1 = 5,251$ мм; $R_2 = 2,625$ мм); г) коническое сопло с диаметром входного участка $D_1 = 5$ мм и диаметром выходного участка $D_2 = 1,5$ мм

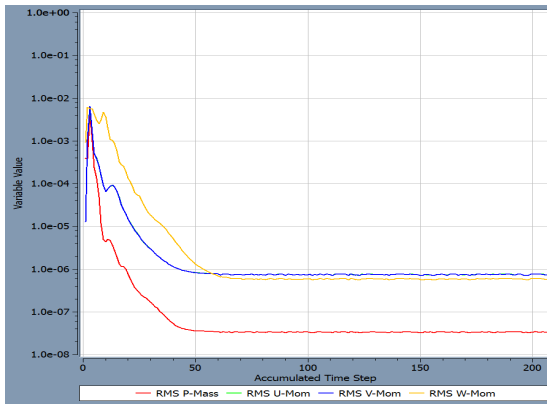
а)



б)



в)



г)

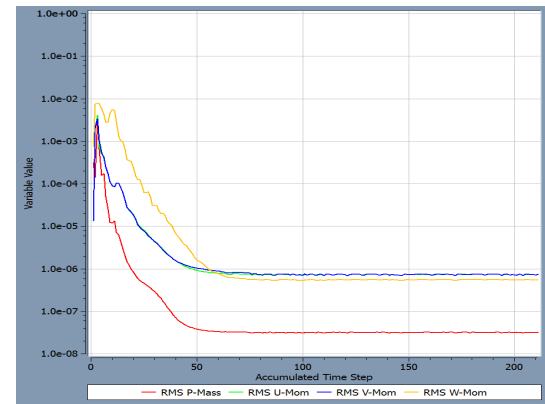
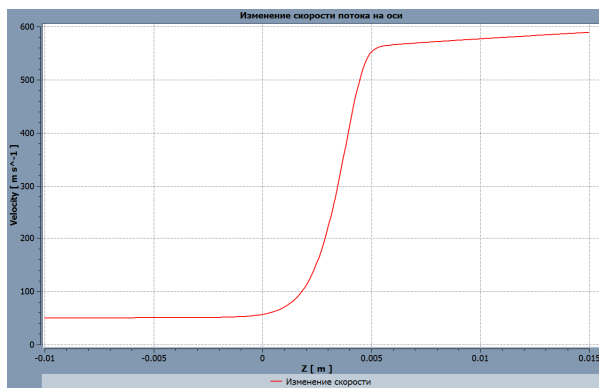


Рис. 10. Графики скорости сходимости вычислительного алгоритма для расчёта сопел с разной геометрией внутреннего профиля:

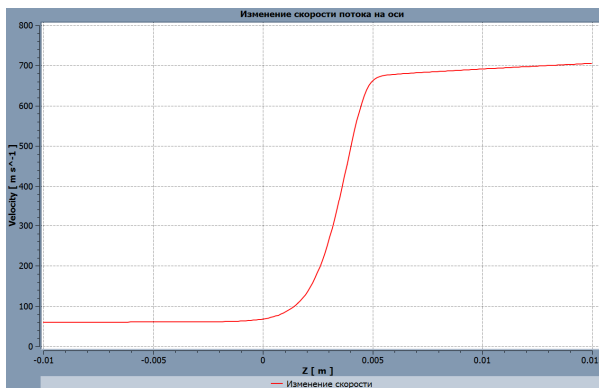
а) для сопла с $R_1=R_2=3,938$ мм; б) для сопла с $R_1=2,625$ мм, $R_2=5,251$ мм;

в) для сопла с $R_1=5,251$ мм; $R_2=2,625$ мм; г) для конического сопла с $D_1=5$ мм, $D_2=1,5$ мм

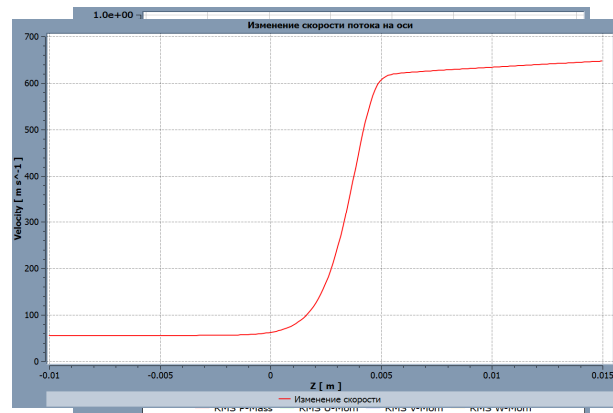
а)



б)



в) в)



г) г)

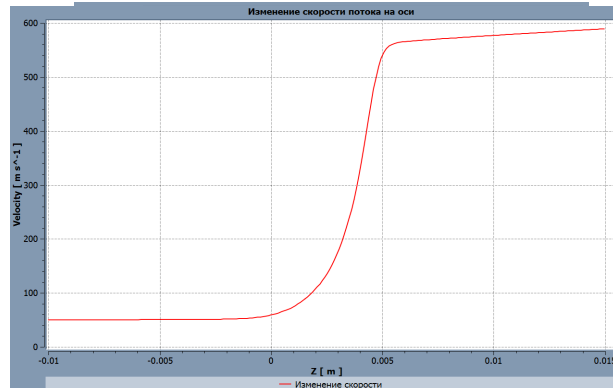
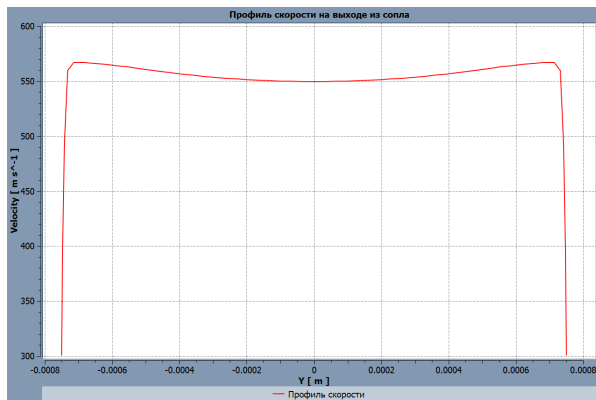


Рис. 11. Графики изменения скорости потока в соплах с разной геометрией внутреннего профиля в продольном направлении по длине сопла:

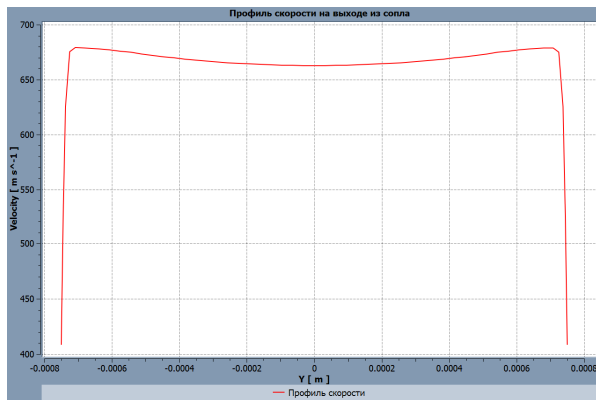
а) для сопла с $R_1 = R_2 = 3,938$ мм; б) для сопла с $R_1 = 2,625$ мм, $R_2 = 5,251$ мм;

в) для сопла с $R_1 = 5,251$ мм, $R_2 = 2,625$ мм; г) для конического сопла с $D_1 = 5$ мм, $D_2 = 1,5$ мм

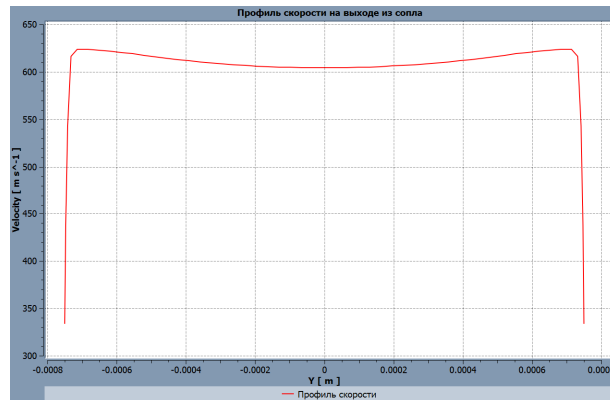
а)



б)



в)



г)

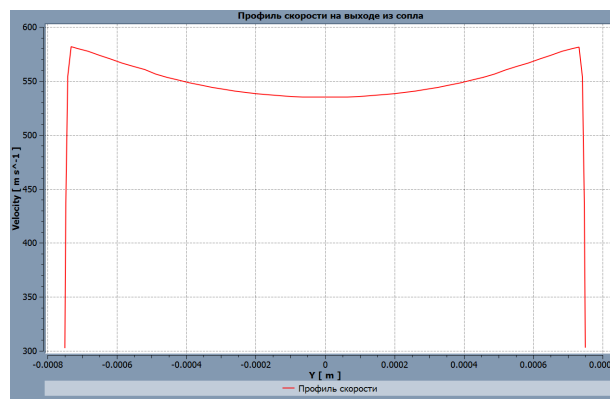


Рис. 12. Графики распределения скорости потока на выходе из сопел с разной геометрией внутреннего профиля:
 а) для сопла с $R_1 = R_2 = 3,938$ мм; б) для сопла с $R_1 = 2,625$ мм, $R_2 = 5,251$ мм;
 в) для сопла с $R_1 = 5,251$ мм, $R_2 = 2,625$ мм; г) для конического сопла с $D_1 = 5$ мм, $D_2 = 1,5$ мм

ВЫВОДЫ

1. Повреждения жестких покрытий автомобильных дорог и аэродромов, как правило, имеют локальный характер. При производстве эксплуатационного ремонта поврежденный верхний слой удаляется на требуемую глубину с применением различных технологий. Помимо традиционных методов удаления разрушенной верхней части покрытия с помощью фрез, перфораторов, пневмомолотков, металлических щеток, бетоноломных установок для этих целей предложена технология гидрорезания, которая позволяет эффективно удалить покрытие за счет энергии высокоскоростной гидроструи.
2. В качестве подхода к развитию гидроструйных технологий ремонта жестких покрытий автомобильных дорог и аэродромов предложена качественная оценка технологии гидрорезания как технической системы, состоящей из следующих физических процессов: гидрорезание жесткого покрытия; формирование высокоскоростной жидкостной струи в сопловом устройстве гидрорежущего инструмента.
3. Предложена зависимость для расчета глубины гидрорезания жестких покрытий автомобильных дорог и аэродромов. Проведено исследование влияния гидродинамических и режимных параметров высокоскоростной жидкостной струи гидрорежущего инструмента на прочность жестких покрытий.
4. Для прогнозирования закономерностей формирования высокоскоростной гидроструи в сопловом устройстве механизма гидрорезания и обоснования эффективного внутреннего профиля соплового устройства, позволяющего получить гидрострую с большим режущим потенциалом, построена математическая модель формирования высокоскоростной гидроструи, основанная на модели турбулентности « $k-\varepsilon$ ». Сформулированные уравнения модели течения рабочей жидкости в сопловом устройстве позволили провести исследования основных закономерностей и особенностей течения воды в соплах в зависимости от формы их внутреннего профиля.

ЛИТЕРАТУРА

1. Подкин А.Л. Оценка остаточного ресурса покрытий ИВПП и эффективные методы их ремонта / А.Л. Подкин // *Аэропорты. Прогрессивные технологии.* – 2002. – № 1. – С. 20-22.
2. Чеков А.Н. Эффективный материал для текущего ремонта цементобетонных покрытий взлетно-посадочных полос / А.Н. Чеков // *Аэропорты. Прогрессивные технологии.* – 2001. – № 4. – С. 10–11.
3. Эсаулов С.Л. Материалы для ремонта цементобетонных покрытий в новом году / С.Л. Эсаулов // *Аэропорты. Прогрессивные технологии.* – 2001. – № 4. – С. 6.
4. Бураков А.В. Методы прогнозирования гидрорезания материалов / А.В. Бураков, О.Р. Дорняк, В.Ф. Лазукин, А.А. Хатунцев // *Сборник статей по материалам докладов XXIII межвузовской НПК «Перспектива-2013». Проблемы и технологии инженерно-аэродромного обеспечения войск. Воронеж: ВУНЦ ВВС «ВВА», 2013. – С. 44–53.*
5. *Andreas W. Hydrodemolition of Concrete Surfaces and Reinforced Concrete Structures. – Germany: Faculty of Geo-Resources and Materials Technology Aachen University, 2005. – 270 p.*
6. Поляков А.В. Разработка метода расчета эффективности процесса резания горных пород струями воды сверхвысокого давления и обоснование параметров устройства для их получения применительно к проходческим комбайнам: дис. ... канд. техн. наук: 05.05.06 / Алексей Вячеславович Поляков. Тула, 2006. – 184 с.
7. Бураков А.В. Математическая модель гидрорезания аэродромного монолитного цементобетонного покрытия / А.В. Бураков, В.Ф. Лазукин, О.Р. Дорняк // *Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Строительство и архитектура.* – 2014. – № 2 (34). – С. 61–71.
8. Идельчик И.Е. *Справочник по гидравлическим сопротивлениям / И.Е. Идельчик. – М.: Машиностроение, 1992. – 672 с.*
9. Лойцянский Л.Г. *Механика жидкости и газа / Л.Г. Лойцянский. – М.: Дрофа, 2003. – 840 с.*
10. Юн А.А. *Теория и практика моделирования турбулентных течений / А.А. Юн. – М.: ЛИБРОКОМ, 2009. – 272 с.*

LITERATURA

1. Podkin A.L. *Ocenka ostatochnogo resursa pokrytij IVPP i effektivnye metody ih remonta* / A.L. Podkin // *Aeroporty. Progressivnye tekhnologii*. – 2002. – № 1. – S. 20–22.
2. Chekov A.N. *Effektivnyj material dlya tekushchego remonta cementobetonnyh pokrytij vzletno-posadochnyh polos* / A.N. Chekov // *Aeroporty. Progressivnye tekhnologii*. – 2001. – № 4. – S. 10–11.
3. Esaulov S.L. *Materialy dlya remonta cementobetonnyh pokrytij v novom godu* / S.L. Esaulov // *Aeroporty. Progressivnye tekhnologii*. – 2001. – № 4. – S. 6.
4. Burakov A.V. *Metody prognozirovaniya gidrorezaniya materialov* / A.V. Burakov, O.R. Dorniyak, V.F. Lazukin, A.A. Hatuncev // *Sbornik statej po materialam dokladov XXIII mezhvuzovskoj NPK «Perspektiva 2013». Problemy i tekhnologii inzhenerno-aerodromnogo obespecheniya vojsk. Voronezh: VUNC VVS «VVA», 2013. – S. 44–53.*
5. Andreas W. *Hydrodemolition of Concrete Surfaces and Reinforced Concrete Structures*. – Germany: Faculty of Geo-Resources and Materials Technology Aachen University, 2005. – 270 p.
6. Polyakov A.V. *Razrabotka metoda rascheta effektivnosti processa rezaniya gornyh porod struyami vody sverhvyssokogo davleniya i obosnovanie parametrov ustrojstva dlya ih polucheniya primenitel'no k prohodcheskim kombajnam: dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.05.06 / Aleksej Vyacheslavovich Polyakov. Tula, 2006. – 184 s.*
7. Burakov A.V. *Matematicheskaya model' gidrorezaniya aerodromnogo monolitnogo cementobetonnoogo pokrytiya* / A.V. Burakov, V.F. Lazukin, O.R. Dorniyak // *Nauchnyj vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Stroitel'stvo i arhitektura*. – 2014. – № 2 (34). – S. 61–71.
8. Idel'chik I.E. *Spravochnik po gidravlicheskim soprotivleniyam* / I.E. Idel'chik. – M.: Mashinostroenie, 1992. – 672 s.
9. Lojcyanskij L.G. *Mekhanika zhidkosti i gaza* / L.G. Lojcyanskij. – M.: Drofa, 2003. – 840 s.
10. Yun A.A. *Teoriya i praktika modelirovaniya turbulentnyh techenij* / A.A. Yun. – M.: LIBROKOM, 2009. – 272 s.

.....
**DEVELOPMENT OF HYDROJET TECHNOLOGIES FOR REPAIRING
ROAD AND AIRFIELD RIGID PAVEMENTS**

*Doctor of Engineering, Professor D.E. Barabash,
Ph. D. (Tech.) A.P. Lapshin,
Ph. D. (Tech.) A.V. Burakov
(«Air Force Academy named after Professor
N.Ye. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin»)
Contact information: barabash60170@yandex.ru;
schetchik777@mail.ru*

Over the past few years there has been an increasing need for operational repairs of road and airfield rigid pavements. This is due to the fact that a significant part of the existing rigid pavement roads and airfields located in the regions of Russia with different climate and operating conditions. The article considers the results of research of the hydrojet technologies used for concrete pavement repair of roads and airfields of state aviation.

Key words: *hydro cutting, rigid pavements, repair technology, mathematical modeling, nozzle.*

Рецензент: д-р техн. наук В.В. Ушаков (Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет («МАДИ»)).

Статья поступила в редакцию: 25.10.2021 г.