

05.04.13  
167

На правах рукописи

Школин Сергей Борисович

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРЕДЕЛЬНЫХ РЕЖИМОВ И РАЗРАБОТКА  
МЕТОДА РАСЧЕТА ЖИДКОСТНОГАЗОВОГО ЭЖЕКТОРА**

Специальность

05.04.13 – "Гидравлические машины, гидропневмоагрегаты "

**АВТОРЕФЕРАТ**

**диссертации на соискание ученой степени**

**кандидата технических наук**

Омск – 2009



Работа выполнена на кафедре «Гидравлика и гидропневмосистемы»  
Южно-Уральского государственного университета.

Научный руководитель доктор технических наук, профессор  
Спиридонов Евгений Константинович.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
Носков Александр Семенович,  
кандидат технических наук, доцент.  
Михайлов Андрей Гаррьевич.

Ведущая организация ОАО «Государственный ракетный  
центр имени академика В.П. Макеева»

Защита состоится 2 июля 2009 года, в 14-00, на заседании диссертационного совета Д 212.178.09 в Омском государственном техническом университете по адресу: 644050, г Омск, пр. Мира, д. 11

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Южно-Уральского государственного университета.

Автореферат разослан «\_\_» мая 2009 года.

Ученый секретарь

диссертационного совета

доктор технических наук, профессор

Г С. Аверьянов

## КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ



### Актуальность темы

Жидкостногазовые эжекторы на сегодняшний день находят широкое применение во многих отраслях народного хозяйства. Данные струйные аппараты используются в энергетике, металлургии, химической, нефтяной и газовой промышленности в качестве газоотводящих аппаратов, вакуумных насосов, насосов-смесителей газовых, жидких и газообразных сред, гидроккомпрессоров.

В технике существует целый ряд производств, проведение технологического процесса в которых возможно только при условии применения струйных насосов. Например, в химической промышленности они используются для удаления газов из вакуум-холодильных и вакуум-кристаллизационных аппаратов при осуществлении процессов дистилляции, процессов сушки и выпарки, в системах улавливания легких фракций в процессе транспортировки и распределения бензинов. Широко применяются струйные аппараты в энергетике при вакуумировании конденсаторов паровых турбин. С развитием вакуумной металлургии возникло новое направление – метод внепечной обработки жидкого металла. Проведение процесса дегазации металла в ковше стало возможным благодаря разработке и применению в промышленных дегазационных установках вакуумных эжекторов большой производительности.

Столь широкое распространение струйных насосов в технике обусловлено их конструктивной простотой, отсутствием подвижных частей, возможностью размещения в труднодоступных местах.

Исследования по совершенствованию эжекционных устройств различного назначения (гидро- и пневмотранспорта, вакуумирующих и компрессорных устройств и пр.), проводимые в течение ряда лет на кафедре гидравлики и гидропневмосистем ЮУрГУ, свидетельствуют о том, что эжекционные устройства, обладая высокой надежностью, во многих случаях потребляют неоправданно высокие расходы рабочей среды и энергии. Это обусловлено тем, что КПД современных систем на основе жидкостногазовых эжекторов весьма невысок. Существующие методы расчета не позволяют в полной мере выявить потенциальные возможности струйного аппарата, и, следовательно, спроектировать эжекторную установку с минимальным энергопотреблением. Следовательно, вопрос повышения эффективности работы и расширения диапазонов рабочих режимов жидкостногазовых струйных насосов и систем на их основе является актуальным.

### Цель исследования

Выявление предельно достижимых характеристик ЖГЭ и разработка метода расчета данных струйных аппаратов для систем различного назначения.

### Задачи исследования

1. Расчет и анализ экстремальных характеристик ЖГЭ
2. Выявление ограничительных условий (предельных режимов) анализом кинематики потоков и структуры течения.

Южно-Уральский  
гос. университет  
НАУЧНАЯ  
БИБЛИОТЕКА

3 Подтверждение экспериментальными исследованиями существования предельных по структуре потока режимов, выявление условий реализации данных ограничений.

4 Создание метода расчета ЖГЭ на основе экстремальных характеристик и предельных режимов.

5 Выработка принципов оптимального синтеза установок на основе ЖГЭ

#### **Метод исследования**

Заключается в аналитическом исследовании рабочего процесса ЖГЭ на основе уравнений состояния, сохранения массы, количества движения и энергии, рассмотрении и анализе рабочих характеристик, рассчитываемых с применением численных методов, и сравнении полученных результатов с экспериментальными данными ЮУрГУ и других организаций.

#### **Основные защищаемые положения**

1 Область режимов, достижимых с точки зрения законов сохранения, ограничивается экстремальной характеристикой ЖГЭ, представляющей собой огибающую семейства рабочих характеристик. Данное ограничение, отдельно рассмотренное, допускает достижение высоких, не подтверждающихся практикой значений производительности аппарата по газу

2. Реально достижимый коэффициент эжекции может быть меньше, чем рассчитанный по уравнениям сохранения. Это обусловлено тем, что производительность ЖГЭ ограничивается:

а) условием сближения скоростей активной жидкости и пассивного газа (т.е. скорость пассивного потока без дополнительных устройств не может превышать скорость активного).

б) Предельными структурами двухфазного потока: смыканием капель жидкости в камере смешения; и смыканием пузырьков газа в ленистом бурном потоке.

3. Расширение диапазонов реализуемых режимов работы и повышение производительности ЖГЭ возможно за счет повышения предельного коэффициента скольжения при разгоне пассивного потока дополнительными побудительными устройствами.

4 Метод расчета ЖГЭ на основе экстремальных характеристик и предельных по достижимому коэффициенту эжекции и структуре двухфазного потока режимов.

#### **Достоверность полученных результатов**

Достоверность результатов подтверждается применением в качестве базовой общеизвестной системы уравнений на основе уравнений сохранения массы, энергии и количества движения, а также использованием для проверки сделанных предположений большого количества опытных данных. При этом рассматриваются результаты экспериментов, полученные учеными различных отечественных научных школ (ВТИ, МГТУ, ЦИАМ, ЮУрГУ, ВГУЗ-ЛМЗ) и зарубежными учеными (Каннингем и Допкин).



### **Научная новизна результатов**

1 Выявлены физически достижимые параметры, которые отражаются экстремальной характеристикой. Эти физические ограничения определяются сопротивлением проточной части ЖГЭ и отражаются базовыми уравнениями.

2. Выявлены особенности состояния двухфазного потока в проточной части ЖГЭ, установлены реальные ограничения производительности ЖГЭ.

3 Разработан метод расчета ЖГЭ на основе экстремальных характеристик и предельных режимов.

### **Практическая ценность работы**

1 Рассчитаны и проанализированы предельные режимы в поле рабочих напорных характеристик для практически значимых диапазонов основных параметров его работы.

2. Предложены направления дальнейших исследований способов расширения диапазона достижимых параметров ЖГЭ

3 Метод расчета ЖГЭ дополнен номограммами, что облегчает первоначальный выбор основных параметров струйного аппарата.

4 Выполнено сопоставление энергетической эффективности работы систем глубокого вакуумирования, сконструированных только на основе пароструйных эжекторов, и установок, в которых одна или несколько ступеней заменены на ЖГЭ Показано, что применение ЖГЭ в определенных интервалах параметров энергетически целесообразно. Предложены рекомендации по оптимальному синтезу систем на основе ЖГЭ

### **Апробация работы**

Основные результаты исследований, вошедшие в диссертационную работу, докладывались и обсуждались на:

– IV Международной научно-технической конференции «Гидравлические машины, гидроприводы и гидропневмоавтоматика. Современное состояние и перспективы развития» г Санкт-Петербург 2006.

– Всероссийской научно-технической конференции «Динамика машин и рабочих процессов» г Челябинск 2007

– Международной и научно-методической конференции «Гидрогазодинамика, гидравлические машины и гидропневмосистемы» г Москва 2006, 2008.

– 61-й научной конференции Южно-Уральского государственного университета, секция гидравлики и гидропневмосистем г Челябинск 2009

– 1-й научной конференции аспирантов и докторантов Южно-Уральского государственного университета г Челябинск 2009.

### **Публикации и личный вклад автора**

По теме диссертации опубликованы 7 печатных работ, из них: 3 – тезисы докладов, 3 – статьи из них 2 – статьи в журнале из перечня ВАК, 1 – отчет по НИР

Автором выполнено:

- выявление предельных структур двухфазного потока в проточной части ЖГЭ

- уточнение физико-математической модели и ее численный анализ.
- анализ обширного поля опытных данных различных авторов с целью проверки адекватности модели.
- формулировка рекомендаций по выбору диапазона параметров энергетически выгодной работы ЖГЭ на основе положений оптимального синтеза систем с ЖГЭ

### **Объем и структура работы**

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, основных выводов, списка литературы, включающего 101 наименование. Работа изложена на 159 страницах машинописного текста, содержит 91 рисунок, 15 таблиц.

### **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность проблемы, определено место данной работы в цикле исследований, проводимых кафедрой гидравлики и гидропневмосистем ЮУрГУ, а также приводится краткая характеристика диссертации.

**В первой главе** рассматриваются известные на данный момент типы струйных аппаратов для перекачки газов и вакуумирования, приводятся условия, при которых их применение экономически оправдано, описываются распространенные в промышленности и встречающиеся в научной литературе типовые схемы применения ЖГЭ. Показано, что ЖГЭ может быть использован в качестве средства для получения глубокого вакуума, гидрокомпрессора, смесителя сред, теплообменника и т. д. Наибольшая эффективность использования ЖГЭ достигается в случаях выполнения струйным аппаратом нескольких функций одновременно. Кроме того, в работе рассматривается типовая схема ЖГЭ и наиболее известные способы ее реализации, т.е. конструкции двухфазных струйных насосов.

Наиболее весомый вклад в исследование рабочего процесса ЖГЭ был сделан в работах, Н.М. Соколова, Е.Я. Зингера, Л.Д. Бермана, Г.И. Ефимочкина (ВТИ), Ю.Н. Васильева и Е.П. Гладкова (ЦИАМ), В.Г. Цегельского, В.А. Чернухина (МГТУ), В.С. Елизарова, А.П. Безухова (ВТУЗ-ЛМЗ), В.К. Темнова, Е.К. Спиридонова, А.В. Подзерко (ЮУрГУ), Витте, Каннингем, Допкин.

В работах Е.Я. Соколова и Н.М. Зингера, Л.Д. Бермана, Г.И. Ефимочкина рабочие напорные характеристики эжекторов рассчитываются по зависимостям, которые получены обработкой результатов экспериментов, выполненных авторами. При помощи исследования на максимум этих характеристик получают экстремальные характеристики ЖГЭ. Применение экстремальных характеристик позволяет более точно оценить предельные возможности ЖГЭ на этапе проектирования.

В работах Ю.Н. Васильева, Каннингем, Допкина, В.Г. Цегельского рабочий процесс ЖГЭ описывается на основе совместного решения уравнений сохранения массы, количества движения и энергии при различных допущениях и дополнительных полуэмпирических зависимостях. В работах этих авторов отмечается, что рабочие характеристики большинства жидкостногазо-

вых струйных аппаратов имеют срыв, причины существования которого объясняются ими по-разному. При этом экспериментально подтвержденные случаи подобных срывов зачастую не согласуются с расчетами, что говорит о наличии дополнительных ограничительных условий.

Таким образом, существующие эмпирические методы расчета ЖГЭ зачастую верно описывают режимы, соответствующие срыву рабочей напорной характеристики, и позволяют производить выбор основных параметров струйного аппарата на основе экстремальных характеристик. Их основным недостатком является ограниченность диапазонов рабочих параметров применимости, кроме того, данные методы зачастую дают неверные значения достижимых степеней повышения давлений на участках до срыва напорной рабочей характеристики.

Известные аналитические методы расчета (в том числе учитывающие срывы характеристик, возникающие при заклинивании камеры смешения и недостаточной ее длине) дают верные значения степеней повышения давления аппарата, но не позволяют определить реально достижимые коэффициенты эжекции, которые бы согласовались с экспериментальными данными. Что, в свою очередь, не позволяет определить экстремальные характеристики и спроектировать установку с минимальным энергопотреблением.

Из сказанного выше следует, что вопрос совершенствования методов расчета и расширения диапазонов рабочих режимов жидкостногазовых струйных насосов и систем на их основе требует приоритетного решения.

Глава завершается формулировкой цели и постановкой задач исследования.

**Во второй главе** вводятся основные размерные и безразмерные параметры работы ЖГЭ, описывается рабочий процесс, приводится математическая модель ЖГЭ на основе уравнений состояния, сохранения массы, количества движения и энергии, которая дополняется введением ограничений по коэффициенту скольжения и структуре двухфазного потока. Проводится численный анализ возможности реализации режимов работы эжектора.

Принципиальная схема ЖГЭ показана на рис. 1. Струя жидкости, формируемая соплом, с большой скоростью устремляется в рабочую камеру и увлекает за собой газ из приемной камеры. По мере продвижения вдоль рабочей камеры струя частично или полностью дробится на капли, которые, обмениваясь количеством движения с эжектируемым газом, распределяются по поперечному сечению камеры.

В этом двухфазном бурном потоке сплошной средой является газ, а дискретной – струи и капли жидкости, причем скорости движения жидкости и газа различные. На этом начальном участке смесительной камеры давление постепенно нарастает по длине потока.

При некотором противодействии за эжектором в газожидкостном потоке на небольшой длине русла происходит внезапное изменение структуры течения. Это структурное изменение двухфазного потока, называемое прыжком или скачком перемешивания, сопровождается резким возрастанием давления, снижением средней по сечению скорости, диссипацией энергии. За скачком

перемешивания сплошной средой в потоке уже является жидкость, а дискретной – газ. Причем скольжение между ними практически отсутствует. После рабочей камеры пузырьковый двухфазный поток поступает в диффузор, где часть кинетической энергии потока смеси преобразуется в потенциальную.

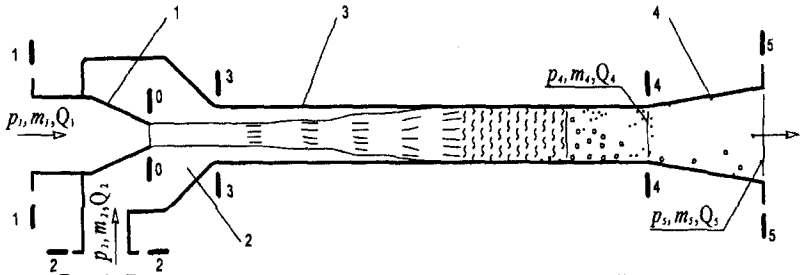


Рис. 1 Схема жидкостногазового струйного насоса с одноструйным соплом:

1 – сопло; 2 – приемная камера; 3 – камера смешения; 4 – диффузор.

Сечения: 1-1 – подвод активной жидкости; 2-2 – подвод пассивного потока газа; 3-3 – входное сечение камеры смешения; 4-4 – входное сечение диффузора; 5-5 – выходное сечение аппарата.

$P_i, T_i, m_i, Q_i$  – давление, температура, массовый и объемный расходы в  $i$ -м сечении

Двухфазный поток, в зависимости от энергетического состояния, в фиксированном сечении проточной части эжектора может быть бурным, критическим и спокойным. В бурном потоке главной составляющей удельной энергии сечения ( $E = E_{\text{п}} + E_{\text{к}}$ ) является кинетическая энергия ( $E_{\text{к}}$ ), в спокойном потоке – потенциальная  $E_{\text{п}}$ , в критическом состоянии  $E_{\text{п}} = E_{\text{к}}$ . До прыжка перемешивания жидкостногазовый поток в ЖГЭ бурный, за скачком – спокойный.

Поскольку удельная энергия потока в сечении при постоянной геометрии и расходах сред является функцией давления, критерием, определяющим энергетическое состояние газожидкостных потоков, принимается критическое давление  $p_{\text{к}}$ . Данное давление соответствует минимуму зависимости  $E = E(p)$ . Так потоки находятся в бурном состоянии при давлениях  $p < p_{\text{к}}$ , в спокойном состоянии, когда  $p > p_{\text{к}}$  и критическом состоянии при равенстве давлений:  $p = p_{\text{к}}$

Базовая система уравнений получена на основе уравнений сохранения массы, энергии и количества движения в предположении, что статическое давление, скорость и площадь нормальных сечений струи жидкости изменяются незначительно; сужения газа и жидкости в соплах осуществляется плавно; потоки жидкости и газа полностью перемешиваются в пределах камеры смешения; течение смеси в диффузоре безотрывное; массовый расход газа на несколько порядков меньше массового расхода жидкости. В безразмерных координатах базовая система уравнений имеет вид:

$$\varepsilon_{42} = 0,4 \left[ \varepsilon_{42X} + \sqrt{\varepsilon_{42X}^2 - \frac{4 c \alpha_2 \Omega_{03}^2 \Gamma}{K_{\text{п4}} K_{\text{т}}}} \right], \quad (1)$$



$$\varepsilon_{42x} = 1 + \Gamma \Omega_{03} (1 - c \cdot \Omega_{03}), \quad (2)$$

$$c = 1 + 0,5 \zeta_{34}, \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \varepsilon_{52} + \frac{\alpha_2}{K_r} \ln \varepsilon_{52} + \frac{\Gamma}{2} \left[ \frac{\Omega_{03}}{\Omega_{54}} \right]^2 \left[ 1 + \frac{\alpha_2}{\varepsilon_{52} K_{п5} K_r} \right]^2 = \\ = \varepsilon_{42} + \frac{\alpha_2}{K_r} \ln \varepsilon_{42} + \frac{\Gamma \Omega_{03}^2}{2} \left[ 1 + \frac{\alpha_2}{\varepsilon_{42} K_{п4} K_r} \right]^2 (1 - \zeta_{45}) - \frac{\alpha_2}{K_r} \ln \frac{K_{п5}}{K_{п4}} \end{aligned} \quad (4)$$

Здесь  $\varepsilon_{52} = \frac{P_5}{P_2}$  ( $\varepsilon_{42} = \frac{P_4}{P_2}$ ) – степень повышения давления (степень сжатия) для эжектора с диффузором (без диффузора);  $\alpha_2 = \frac{Q_{г2}}{Q_{ж}}$  – объемный коэффициент эжекции;  $\Gamma = \frac{\rho_{ж} V_{ж0}^2}{P_{г2}}$  – относительное динамическое давление струи;  $\Omega_{03} = \frac{A_0}{A_3}$  – относительная площадь сопла;  $\Omega_{54} = \frac{A_5}{A_4}$  – относительная площадь диффузора;  $K_{пi} = 1 - \frac{P_{н.п}}{P_i}$  – поправочный коэффициент на давление насыщенных паров жидкости в  $i$ -м сечении (см. рис. 1);  $P_{н.п}$  – давление насыщенных паров при температуре рабочей жидкости;  $K_r = \frac{T_r}{T_{ж}}$  – поправочный коэффициент на различие температур газа  $T_r$  и жидкости  $T_{ж}$  перед их поступлением в эжектор;  $\zeta_{34}$  и  $\zeta_{45}$  – коэффициенты сопротивления камеры смешения и диффузора.

Для оценки потенциально возможных режимов работы жидкостногазового эжектора в работе рассматриваются экстремальные характеристики, устанавливающие взаимосвязь между предельно достижимыми параметрами струйного аппарата.

Экстремальные характеристики получены путем исследования на максимум выражений (1) – (4), причем для насоса без диффузора это можно сделать аналитически, для ЖГЭ с диффузором ввиду громоздкости выражений только численно. Экстремальная характеристика, как показано на рис. 2, делит все поле  $\alpha_2 - \varepsilon_{52}$  на две области, ниже ее область принципиально достижимых режимов, выше недостижимых.

Однако практика свидетельствует, что для ЖГЭ не все режимы, соответствующие точкам экстремальной характеристики, могут быть реализованы. Следовательно, существуют иные ограничения поля достижимых параметров струйного аппарата.

Без дополнительных побудительных устройств струя жидкости может сообщить спутному пассивному потоку скорости, не превышающие скорость

струи. Исходя из этого условия, отношение скоростей жидкости и газа (коэффициент скольжения –  $\psi = \frac{V_r}{V_{ж}}$ ) ограничено предельной величиной  $\psi_*$ .

$$\psi_* = \frac{V_{r3}}{V_{ж3}} = \frac{2}{(n+1)(n+2)} \left[ 1 + \frac{n\sqrt{\Omega_{03}}}{1+\sqrt{\Omega_{03}}} \right], \quad (5)$$

$n=1/7...1/12$  (при турбулентном течении). Тогда при относительной площади сопла  $\Omega_{03}=0,06...0,50$  предельный коэффициент скольжения  $\psi_* = 0,84...0,91$

Таким образом, дополнительным соотношением, характеризующим особенность рабочего процесса жидкостногазового струйного насоса, является неравенство  $\psi \leq \psi_*$ , или:

$$\frac{\alpha_2 \Omega_{03}}{K_{п3} K_T (1 - \Omega_{03})} \leq \psi_*. \quad (6)$$

Кроме ограничения по коэффициенту скольжения рассматриваются ограничительные условия по структуре двухфазного потока.

Из условия заполнения цилиндрического пространства камеры жидкими шариками приходим к следующему соотношению объемных расходов газа  $Q_{г4}$  и жидкости  $Q_{ж}$  за прыжком перемешивания:

$$\frac{Q_{г4}}{Q_{ж}} = \frac{27}{2\pi(3 + \frac{d^2}{D^2})} - 1 \quad (7)$$

При этом предполагается: а) струя дробится на капли равного диаметра; б) капли жидкости и пузырьки газа имеют сферическую форму в) структура упаковки капель жидкости кубическая.

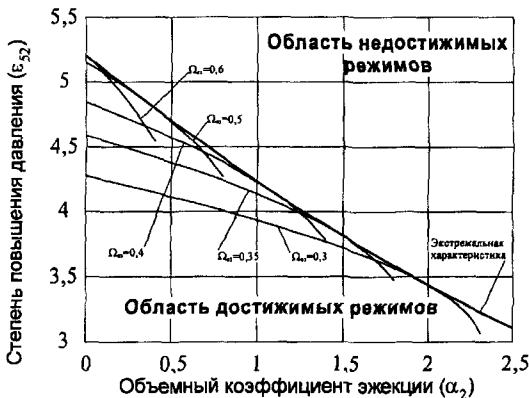


Рис. 2. Рабочие напорные и экстремальная характеристики ЖГЭ ( $\Gamma = 14,8$ ,  $\Omega_{34} = 4,25$ ,  $\zeta_{34} = 0,4$ ,  $\zeta_{45} = 0,3$ ,  $K_T = 1$ ,  $K_{п3} = 1$ ,  $K_{п4} = 1$ ,  $K_{п5} = 1$ )

Кубической структурой задаемся из следующих соображений. На сегодняшний день нет математических доказательств единственности существования структур возможного максимального или минимального заполнения пространства сферами равного диаметра. По данным академика Н.В. Белова при укладке шаров случайного гранулометрического состава коэффициент заполнения колеблется в

пределах 0,58–0,62, т.е. близок к значениям для кубической упаковки. Траектории капель жидкости направлены главным образом вдоль оси смесительной камеры и их взаимное влияние несущественно, поэтому образование сложноорганизованных структур (например, ГЦК) маловероятно. Также следует учесть, что кубическая упаковка обеспечивает коэффициент заполнения  $\epsilon \approx 0,51$  примерно соответствующий середине интервала возможных значений.

Предположение о сферической форме капель и пузырьков обосновано тем, что такая форма соответствует минимуму энергии сил поверхностного натяжения, следовательно, является наиболее вероятной.

Исследуя зависимость (7) на участке  $d/D_3 < 0,1$  получим соотношение объемных расходов равное 0,43. При изотермическом сжатии объемный расход на входе в приемную камеру  $Q_{r2} = Q_{r4} \cdot \epsilon_{42}$ . Отсюда

$$\alpha'_{..} = 0,43 \cdot \epsilon_{42} \quad (8)$$

При давлениях за камерой смешения  $p_4$  меньше критического  $p_K$  в ней по всей длине наблюдается бурное течение газожидкостной среды. В этих условиях при достаточной длине камеры вероятно существование пенного потока, в котором сплошной фазой также является жидкость. В таком потоке предельной структурой может быть плотная упаковка пузырьков газа, окруженных жидкостью. В этом случае предельный коэффициент эжекции

$$\alpha''_{..} = \frac{1}{0,43} \cdot \epsilon_{42} = 2,33 \cdot \epsilon_{42} \quad (9)$$

Объединяя формулы (8) и (9), приходим к неравенству

$$\alpha_2 < \alpha_{..} = \gamma \cdot \epsilon_{42} \quad (10)$$

Примеры графического представления данных ограничений в координатах рабочих характеристик представлены на рис. 3

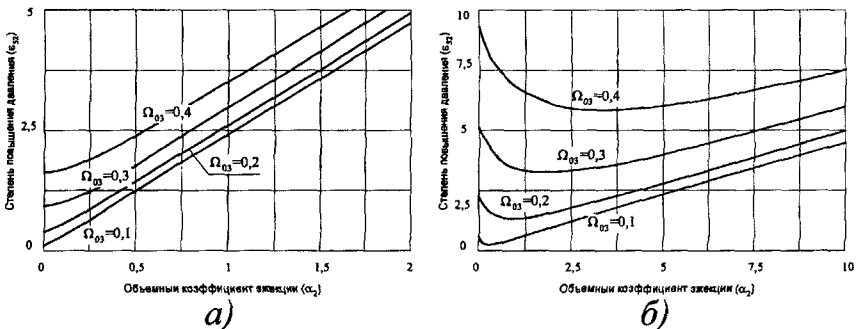


Рис. 3 Кривые первого – а) и второго – б) предельных по структуре потока режимов при различных значениях относительной площади сопла ЖТЭ (при  $\Gamma = 15$ ,  $\Omega_{34} = 4,25$ ,  $\zeta_{34} = 0,4$ ,  $\zeta_{45} = 0,3$ )

В поле рабочих и экстремальной характеристики ЖТЭ кривые предельных по структуре режимов ограничивают область достижимых параметров ЖТЭ.

На рис. 4 приведен пример наложения всех перечисленных выше ограничений на поле рабочих характеристик с соответствующей этому семейству экстремальной характеристикой.

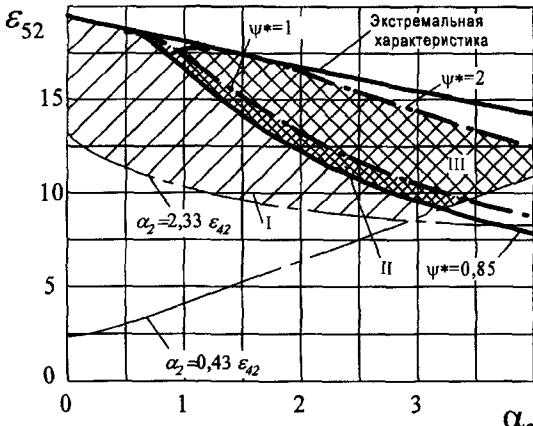


Рис. 4. Области возможных режимов работы ЖГЭ

При рассмотрении рис. 4 видно, что при условии действительности всех ограничивающих условий область реализуемых режимов весьма мала (зона I на рис. 4).

Вместе с тем, эффективным способом повышения показателей работы ЖГЭ представляется расширение диапазонов возможных для реализации режимов. Одним из способов преодоления огра-

ничения по предельному коэффициенту скольжения фаз может быть разгон потока пассивного газа с помощью механического приспособления (крыльчатки). Благодаря такому устройству представляется возможным повысить скорость пассивного потока в области свободной поверхности активной струи без существенного изменения давления всасывания. Теоретически, при значениях скоростей жидкости порядка нескольких десятков метров, при помощи вращающейся крыльчатки возможно получить коэффициенты скольжения выше единицы.

Это означает сдвиг кривой ограничения по коэффициенту скольжения вправо и удлинение реализуемой части рабочей напорной характеристики ЖГЭ. Пример такого расширения области достижимых параметров можно видеть на рис. 4, дополнительная область II соответствует  $\psi = 1$ , область III —  $\psi = 2$ . Видно, что при степени сжатия около 12,5 при коэффициенте скольжения  $\psi = 2$  коэффициент эжекции увеличивается вдвое.

Так как наиболее эффективная работа ЖГЭ (высокие КПД и производительность) соответствуют участкам рабочих характеристик с высокими значениями  $\alpha_2$ , преодоление ограничений, рассмотренных выше, существенно повышает область реализуемых режимов и эффективность работы ЖГЭ.

**В третьей главе** рассматриваются результаты более трехсот опытов, выполненных различными авторами (Н.М. Зингер, В.Г. Цегельский, Ю.Н. Васильев, Каннингем, Е.К. Спиридонов, А.П. Безухов).

Экспериментальные исследования проводились с целью выявления критических и докритических режимов работы струйных аппаратов. По результатам экспериментов строились рабочие напорные характеристики и на их

поле наносились кривые предельных по коэффициенту скольжения и структуре двухфазного потока.

Экспериментальная и теоретическая рабочие характеристики с соответствующими кривыми ограничений для ЖГЭ с относительной площадью сопла  $\Omega_3 = 0,072$  при  $\Gamma = 18,7$  (опыты Н.М. Зингера) показаны на рис. 5.

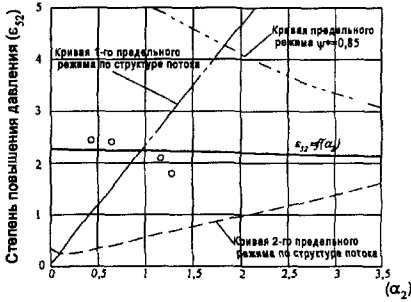


Рис. 5 Рабочая характеристика, экспериментальные точки, кривые ограничений по коэффициенту скольжения и структуре потока ( $\Gamma = 18,7$ ,  $\Omega_3 = 0,072$ ,  $\Omega_{s4} = 16$ )

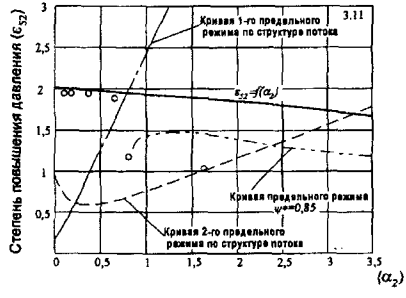


Рис. 6. Рабочая характеристика, экспериментальные точки, кривые ограничений по коэффициенту скольжения и структуре потока ( $\Gamma = 6,84$ ,  $\Omega_3 = 0,17$ ,  $\Omega_{s4} = 10,33$ )

Видно, что срыв экспериментальной характеристики (резкое уменьшение степени сжатия) и отклонение от теоретической характеристики происходит в точке пересечения с кривой первого предельного по структуре потока режима.

На рис. 6, 7, и 8 представлены аналогичные наборы характеристик двухфазных струйных аппаратов с параметрами  $\Gamma = 6,84$ ;  $\Omega_3 = 0,17$  и  $\Gamma = 4,25$ ;  $\Omega_3 = 0,27$  (опыты В.Г. Цегельского); а также  $\Gamma = 35$ ,  $\Omega_3 = 0,3$  (опыты Ю.Н. Васильева).

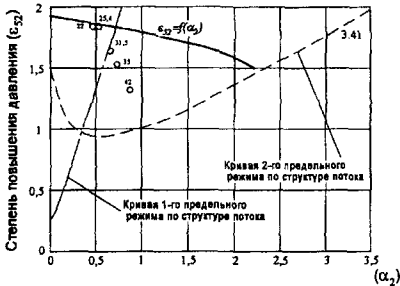


Рис. 7 Рабочая характеристика, экспериментальные точки, кривые ограничений по коэффициенту скольжения и структуре потока ( $\Gamma = 4,25$ ,  $\Omega_3 = 0,27$ ,  $\Omega_{s4} = 12,37$ )



Рис. 8. Рабочая характеристика, экспериментальные точки, кривые ограничений по коэффициенту скольжения и структуре потока ( $\Gamma = 35$ ,  $\Omega_3 = 0,3$ ,  $\Omega_{s4} = 16$ )

Срыв характеристики на данных графиках также соответствует точке пересечения теоретической характеристики и кривой первого предельного по структуре потока режима.

Некоторые результаты экспериментов сведены в табл. 1. Опыты сгруппированы по интервалам значений относительной площади сопла, при этом указывается, какой из режимов реализуется, и местоположение прыжка перемешивания.

При рассмотрении данных в табл. 1 видно, что при значениях относительной площади сопла до  $\Omega_{03} = 0,225 - 0,27$  при любых рассматриваемых величинах относительного давления  $\Gamma$  реализуются ограничения, определяемые первым предельным по структуре двухфазного потока режимом (смыкание капель жидкости).

Таблица 1

Результаты экспериментов					
$\Omega_{03}$	$\Gamma$	1-й	2-й	Положение скачка перемешивания (№ сечения)	Автор
0,072-0,1	13	+	-	После 4	Зингер Н.М.
	14	+	-		
	18	+	-		
0,165-0,178	4,65	+	-	В 4	Цегельский В.Г.
	6,84	+	-	После 4	
	8,63	+	-	В 4	
	7,84	+	-	После 4	Зингер Н.М.
	10,24	+	-		
	16,28	+	-		
	25	+	-		
34	+	-	До 4	Спирidonов Е.К.	
0,225-0,27	4,25	+	-	В 4 м	Цегельский В.Г.
	7,14	+	-		
	8,71	+	-		
	12	+	-		
	18	+	-		
	20	+	-		
	22	+	-		
	16,4	+	-	До 4	Спирidonов Е.К.
0,29-0,3	7,37	+	+	-	Васильев Ю.Н.
	7,5	+	-	До 4	Спирidonов Е.К.
	14,8	+	-	В 4 и после	Каннинтем
	29	-	+	До 4	Спирidonов Е.К.
	2,76	-	+	-	Васильев Ю.Н.
	35	+	-	До 4	

При значениях  $\Omega_{03} = 0,29 - 0,3$  также преимущественно реализуется первый режим, в некоторых случаях опытными данными не опровергается второй предельный по структуре потока режим.

Сопоставление результатов с теорией позволяет заключить, что физико-математическая модель удовлетворительно описывает явления, происходящие в жидкостногазовых эжекторах как на допредельных, так и на предельных режимах (экспериментальные точки удовлетворительно укладываются на теоретические кривые напорных характеристик). Область достижимых режимов сужается из-за ограничения по предельному коэффициенту скольжения фаз.

Достижение срыва характеристик по коэффициенту скольжения в большинстве рассмотренных опытов не наблюдалось, что обусловлено более ранним достижением предельной структуры пенистого потока, или структуры, образованной плотной упаковкой капель жидкости.

Влияние первого предельного по структуре потока режима подтверждается опытными данными. В отдельных случаях при высоких значениях относительной площади сопла возможно достижение второго предельного по структуре потока режима. Выявление условий реализации второго предельного по структуре потока режима требует дальнейших теоретических и экспериментальных исследований.

В четвертой главе формулируются рекомендации по обоснованию решения о применении ЖГЭ в технической системе, разрабатывается метод расчета ЖГЭ и приводится пример такого расчета.

Для того чтобы определиться с выбором конкретного типа струйного аппарата в технической системе, необходимо провести экономическое обоснование. Данное обоснование должно базироваться преимущественно на сопоставлении энергетических затрат на эксплуатацию системы при её реализации различными способами.

В главе выявляются интервалы параметров, обеспечивающих энергетически выгодные режимы работы ЖГЭ

Для этого исследуется КПД струйного насоса в составе установки. В условиях циркуляции активной жидкости по замкнутому контуру выражение для КПД

$$\eta = \frac{m_{\Gamma} R_{\Gamma} \cdot T_{\text{ж}} \cdot \ln \frac{P_5}{P_2}}{Q_{\text{ж}} (\bar{P}_1 - P_5)} = \frac{\alpha_2 \cdot \ln \varepsilon_{s2}}{K_{\Gamma} (\varepsilon_{12} - \varepsilon_{s2})} \quad (11)$$

Численный анализ экстремальных напорных характеристик эжектора на основе формулы (11) показывает, что на каждой из них имеется точка с максимальным КПД, причем с увеличением коэффициента эжекции  $\alpha_2$  точка экстремума смещается в сторону больших значений относительного динамического давления струи  $\Gamma$ . Соединяя соответствующие точки плавной линией, можно получить семейство кривых, экстремальных по КПД. Они устанавливают такую зависимость между достижимой степенью сжатия  $\varepsilon_{s2}$ , коэффициентом эжекции  $\alpha_2$ , им соответствующей относительной площадью

$\varepsilon_{12} = \frac{p_1}{p_2}$  – степень понижения давления,  $\varphi = 0,95$  – коэффициент скорости сопла.

Далее, задаваясь в первом приближении коэффициентами сопротивления камеры смешения  $\zeta_{34}$  и диффузора  $\zeta_{45}$ , а также поправочным коэффициентом  $K_{п3}$ , строятся экстремальная характеристика с нанесенными ограничениями по коэффициенту скольжения и предельной структуре смыкания капель в двухфазном потоке. В работе приведены подобные семейства характеристик (глава 2) при некоторых величинах сопротивлений проточной части, данные графики возможно использовать в качестве номограмм для расчета. Пример построения экстремальной характеристики с ограничениями можно видеть на рис. 11

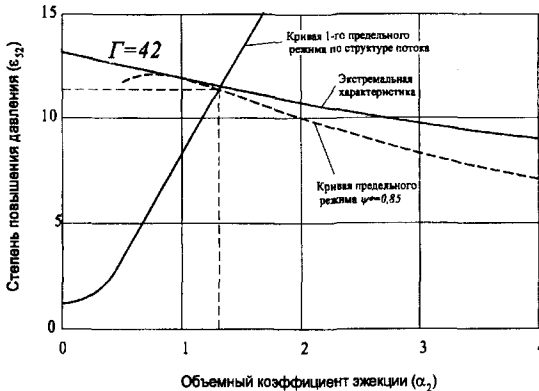


Рис. 11. Экстремальная характеристика ЖЭ дополненная кривыми предельных по коэффициенту скольжения и структуре режимов ( $\Omega_{34} = 4,25$ ,  $\zeta_{34} = 0,4$ ,  $\zeta_{45} = 0,3$ ,  $K_T = 1$ ,  $K_{п3} = 1$ ,  $K_{п4} = 1$ ,  $K_{п5} = 1$ )

руются  $\alpha_2$  и  $Q_2$ , в результате чего может быть принято решение о проектировании установки по многопоточному варианту.

Затем по известному  $\Gamma$ , давлению всасывания и коэффициенту эжекции  $\alpha_2$

определяют скорость на срезе сопла  $v_0 = \sqrt{\frac{p_2}{\rho_{ж}} \Gamma}$ , необходимый расход активного потока  $Q_1 = Q_2 / \alpha_2$ , вычисляют общую площадь проходных сечений

сопла  $A_0 = Q_1 / \omega_0$ , а также диаметр камеры смешения  $D_3 = \sqrt{\frac{4}{\pi \cdot \Omega_{03}} A_0}$

Выбор числа  $N$  отверстий в сопловом устройстве и расчет длины камеры смешения осуществляются по методике Спиридонова Е.К.

В качестве примера расчета ЖЭ рассмотрен случай возможного усовершенствования типовых многоступенчатых систем вакуумирования на ос-

На графике по известной степени сжатия ( $\varepsilon_{32} = \frac{p_3}{p_2}$ ) опреде-

ляется рабочая точка, коэффициент эжекции  $\alpha_2$ , и на графике зависимости  $\Omega_{ори} = f(\alpha_2)$ ,

соответствующей данной экстремальной характеристике, находится значение относительной площади сопла. С учетом вышеприведенных рекомендаций корректи-



нове пароструйных эжекторов путем внедрения в их состав водовоздушных эжекторов.

Технические характеристики рассматриваемых промышленных многоступенчатых систем вакуумирования на основе пароструйных эжекторов приведены в табл. 2.

Таблица 2

## Технические характеристики многоступенчатых систем вакуумирования

Номер системы	1	2	3	4
Наименование	ЭП 11x10	42x0.5	ЭПМ 56x175	ЗЭ 1000x40
Число ступеней	3	4	3	3
Давление всасывания, мм рт.ст., (Па)	10 (1334,2)	0,5 (66,71)	175 (23348)	40 (5337)
Противодавление (абсолютное), кПа	120	101	130	105
Давление пара, МПа (абсолютное)	1,1	1,1	1,1	1,2
Степень сжатия	89,9	1514	5,6	19,7
Степень расширения	824,5	16489	47,1	224,9
Количество откачиваемых газов, кг/ч				
	неконденсирующихся	10	21	43
конденсирующихся	1	—	12	400
Температура рабочего пара, К	493	493	493	493
Расход пара, кг/ч	140	160	205	4000
Расход воды, м <sup>3</sup> /с	$3,1 \cdot 10^{-3}$	0,02	$1,7 \cdot 10^{-3}$	0,04

Анализ представленных в табл. 2 технических характеристик свидетельствует, что системы №3 и №4 возможно полностью заменить водовоздушными струйными насосами, поскольку давление всасывания  $p_2$  выше давления насыщенных паров воды:  $p_2 < p_{нп}$ , (при температуре воды  $t_b = 25^\circ\text{C}$   $p_{нп} = 3,16$  кПа).

В системах №1 и №2 давление всасывания меньше давления насыщенных паров воды, следовательно, водовоздушным струйным насосом возможно заменить только одну или несколько последних пароструйных ступеней. Для того чтобы решить после какой ступени возможно применить ВВЭ, рассмотрим степени сжатия и давление на выходе для каждой ступени.

Таблица 3

## Параметры пароструйных ступеней для системы №1

№ ступени	Степень сжатия	Давление на выходе, кПа
1	7,5	10,01
2	4	40,03
3	3	120

Таблица 4

## Параметры пароструйных ступеней для системы №2

№ ступени	Степень сжатия	Давление на выходе, кПа
1	8	0,53
2	5,52	2,59
3	5,9	17,38
4	5,73	99,59

Из табл. 3 и 4 видно, что в системе №1 на ВВЭ можно заменить последние две ступени и таким образом исключить конденсаторы вообще, так как пар, поступивший после первой ступени, будет конденсироваться на струе воды ВВЭ. В системе №2 установка ВВЭ возможна лишь на выходе третьей ступени.

В табл. 5 представлено сопоставление мощностей исходных и усовершенствованных систем.

Таблица 5

Сравнение затрат мощности систем вакуумирования с пароструйными эжекторами и с ВВЭ

Номер системы	1	2	3	4
Наименование	ЭП 11x10	42x0.5	ЭПМ 56x175	ЗЭ 1000x40
Мощность активного потока ВВЭ $N_{ВВЭ}$ , кВт	3,16	2,61	6,14	534
Суммарная мощность системы с пароструйными эжекторами $N_{ПС}$ , кВт	10,24	7,21	7,5	581,1
Экономия мощности $\Delta N$ , кВт	7,08	4,6	1,36	47,1
Экономия мощности $\Delta N$ , %	69,14	63,8	18,13	8,1

Таким образом, схема эжекторной установки с повышением давления в одном струйном насосе может быть высокоэкономичной лишь при умеренных степенях сжатия газа. При больших степенях повышения давления эжекторную установку целесообразно компоновать из нескольких струйных насосов включенных последовательно.

Для реализации эффективных режимов работы ВВЭ коэффициент эжекции следует ограничивать величиной соответствующей максимально допустимой величине  $\Gamma$ , которая определяется по максимально допустимой величине давления питания.

Во всех случаях, рассмотренных в примере расчета ВВЭ, основанного на экстремальных характеристиках и предельных режимах, замена пароструйных эжекторов на ВВЭ энергетически выгодна.

Наиболее выгодным оказывается применение ВВЭ после пароструйной ступени установки. При этом для создания активного потока ВВЭ может быть использована вода, имеющаяся в системах конденсации и насосы, предназначенные для ее подачи в конденсаторы.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1 Физико-математическая модель жидкостногазового эжектора, основанная на уравнениях состояния, сохранения массы, количества движения и энергии и дополненная ограничительными условиями по кинематике и структуре потока в камере смешения, позволяет выявить предельно достижимые характеристики струйного аппарата.

2. Рассчитаны и проанализированы экстремальные характеристики жидкостногазового эжектора, представляющие собой границу области режимов, достижимых с точки зрения законов сохранения. В действительности, точки экстремальной характеристики могут быть реализованы лишь в области, ограниченной кривыми предельных по кинематике и структуре потока режимов.

3 Анализом экспериментальных исследований подтверждено существование первого предельного по структуре двухфазного потока режима (структуры, образованной плотной упаковкой капель жидкости). В отдельных случаях, при высоких значениях относительной площади сопла и при чрезмерно завышенной длине камеры смешения, возможно достижение второго предельного по структуре потока режима (смыкание пузырьков газа).

4 Выработаны положения оптимального синтеза систем с жидкостногазовыми эжекторами. Эжекторная установка с повышением давления в одном струйном насосе может быть экономичной лишь при умеренных степенях сжатия газа ( $\varepsilon_{s2} < 6$ ). При высоких степенях повышения давления эжекторную установку целесообразно компоновать из нескольких струйных аппаратов, включенных последовательно.

Для реализации энергетически выгодных режимов жидкостногазовых струйных насосов целесообразно ограничение величины давления питания, а коэффициент эжекции следует ограничивать величиной, соответствующей максимально допустимой величине относительного динамического давления струи рабочей жидкости.

5 Предложен метод расчета жидкостногазовых эжекторов, построенный на экстремальных характеристиках и предельных по кинематике и структуре двухфазного потока режимах.

6. Способом повышения показателей работы жидкостногазовых эжекторов является расширение диапазонов возможных для реализации режимов путем преодоления ограничения по предельному коэффициенту скольжения фаз. Например, разгоном потока пассивного газа с помощью дополнительно устройства.

7. Проанализировано применение водовоздушного струйного насоса в известных многоступенчатых воздухоотсасывающих установках с пароструйными эжекторами для вакуумирования конденсаторов паровых турбин. Установлено, что в большинстве случаев замена пароструйных эжекторов на водовоздушные эжекторы энергетически выгодна, наиболее выгодным оказывается применение водоструйных аппаратов после пароструйной ступени установки.

## Список работ по теме диссертации

### В изданиях, рекомендованных ВАК

1 Спиридонов, Е.К. Исследование предельных режимов работы двухфазного эжектора / Е.К. Спиридонов, С.Б. Школин // Вестник ЮУрГУ. Сер. «Машиностроение». – 2008. – Вып. 11 – №10(110). – С. 55 – 61.

2. Спиридонов, Е.К. Применение водовоздушных струйных насосов в системах глубокого вакуумирования / Е.К. Спиридонов, С.Б. Школин // Вестник ЮУрГУ Сер. «Машиностроение» – 2009 – Вып. 13. – №11(144). – С. 18 – 27

### В других изданиях

3 Спиридонов, Е.К. Предельные режимы работы жидкостногазового струйного насоса / Е.К. Спиридонов, С.Б. Школин // Гидравлические машины, гидроприводы и гидропневмоавтоматика. Современное состояние и перспективы развития: тр. IV Международной научно-технической конференции. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2006. – С. 186 - 187.

4. Спиридонов, Е.К. О предельных режимах работы двухфазного водовоздушного эжектора / Е.К. Спиридонов, С.Б. Школин // Гидрогазодинамика, гидравлические машины и гидропневмосистемы: Тр. Междунар. и науч.-метод. конф. – М.. Издательство МЭИ, 2006. – 256 с.

5 Спиридонов, Е.К. Предельные режимы работы двухфазного струйного эжектора / Е.К. Спиридонов, С.Б. Школин // Динамика машин и рабочих процессов: сборник докладов Всероссийской научно-технической конференции – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2007 – С. 167 – 172.

6. Спиридонов, Е.К. Использование водоструйных эжекторов в составе систем глубокого вакуумирования / Е.К. Спиридонов, С.Б. Школин // Гидрогазодинамика, гидравлические машины и гидропневмосистемы: тр. Междунар. и науч.-метод. конф. – М.. Издательство МЭИ, 2008. – 118 с.

7. Научные основы расчета и синтеза систем глубокого вакуумирования со струйными аппаратами: отчет о НИР / Южно-Уральский государственный университет (ЮУрГУ); рук. Е.К. Спиридонов; исполн.. А.В. Подзерко, А.А. Пантюхин, С.Б. Школин. № гос. регистрации 01.200611167, Инв. № 02200801510

Школин Сергей Борисович

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРЕДЕЛЬНЫХ РЕЖИМОВ И РАЗРАБОТКА  
МЕТОДА РАСЧЕТА ЖИДКОСТНОГАЗОВОГО ЭЖЕКТОРА**

Специальность

05.04 13 – " Гидравлические машины, гидропневмоагрегаты "

**АВТОРЕФЕРАТ**

**диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук**

Издательский центр Южно-Уральского государственного университета

---

Подписано в печать 18.05.2009 Формат 60×84 1/16. Печать цифровая.  
Усл. печ. л. 1,16. Уч.-изд. л. 1 Тираж 100 экз. Заказ 164/205

---

Отпечатано в типографии Издательского центра ЮУрГУ  
454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76.