

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ УКРАИНЫ

ISSN 0201-744X

ISSN 0372-6053

# ВЕСТНИК

НАЦИОНАЛЬНОГО  
ТЕХНИЧЕСКОГО  
УНИВЕРСИТЕТА  
УКРАИНЫ

“КИЕВСКИЙ  
политехнический  
ИНСТИТУТ”

**машиностроение**

1999

34



УДК 532.529:621.6.052

С.В.Сапожников, научн. сотр., Сумский государственный ун-т

Общее и отличное в явлении срыва параметров при критическом газосодержании в центробежном и свободновихревом насосах

В работе рассмотрены рабочие процессы центробежного и свободновихревого насосов при увеличении газосодержания на входе в насос, а так же определены зоны в проточной части, в которых происходит разрыв сплошности потока. Сделано сравнение явлений срыва параметров указанных типов насосов.

1. Необходимость изучения явления

Выявление причин срыва параметров центробежного и свободновихревого насосов при определенной величине объемного газосодержания на входе в насос, называемой критической, является сложной задачей. Существуют различные предположения о причинах, вызывающих срыв параметров лопастного насоса. Несмотря на достаточно большое количество визуальных наблюдений, проведенных исследователями течения газожидкостных смесей в каналах центробежного насоса, имеются существенные различия в описании рабочего процесса. Принципиальные разногласия возникают в определении места в проточной части центробежного насоса, где происходит разрыв сплошности потока, который приводит к прекращению подачи насоса.

Центробежные и свободновихревые насосы имеют максимальный КПД для интервала одинакового коэффициента быстроходности 80-150, но различный принцип передачи энергии, а, соответственно, разное конструктивное исполнение. Традиционно сложилось, что центробежные насосы являются более исследованными и наиболее применяемыми для перекачивания газожидкостных смесей. Их рабочий процесс при перекачивании многофазных сред изучался достаточно много. Но, для центробежного насоса обычной конструкции величина критического объемного газосодержания составляет



$\beta_{кр} = 0,1$  [1] или  $\beta_{кр} = 0,12-0,15$  [2]. Под величиной объемного газосодержания понимается отношение расхода газа к расходу всего газосодержащего потока приведенной к условиям входа в насос. Свободновихревые насосы являются относительно новой насосной техникой и их работа на газосодержащей смеси малоизученна. Хотя свободновихревые насосы имеют собственный КПД примерно 2/3 от КПД центробежного насоса, тем не менее доказано, что они способны работать на газожидкостной смеси при газосодержании до 0,45-0,47 [3]. Таким образом, мы имеем разные классы машин, с разными показателями качества – ухудшенные показатели энергетической эффективности в СВН при лучшей способности перекачивать газожидкостные смеси и наоборот в центробежных насосах. Представляется целесообразным проведение сопоставительного анализа причин срыва параметров центробежных и свободновихревых насосов, что может быть основой для новых технических решений в направлении улучшения показателей качества обоих типов машин.

## 2. Рабочий процесс центробежного насоса на газосодержащей смеси

Несмотря на достаточную изученность рабочего процесса центробежного насоса при перекачивании однородной среды и множество исследований при работе его на газосодержащей смеси нельзя сделать однозначного вывода о причинах срыва параметров. Одни авторы утверждают, что газовая каверна «запирает» проходное сечение межлопаточного канала в области входа в рабочее колесо [4], другие – в области выхода из рабочего колеса [5]. Доказывается так же, что главной причиной срыва параметров насоса является газовая область в задней пазухе насоса (между тыльной стороной основного диска рабочего колеса и корпусом насоса) [6]. В этом случае распространение газовой каверны от входа к выходу межлопаточного канала не является причиной прекращения подачи насоса. Причиной срыва параметров насоса является смыкание газовых полостей из межлопаточного канала рабочего колеса и задней пазухи насоса. Как видно, нет однозначности в определении места в проточной части центробежного насоса, являющегося причиной срыва параметров.

Однозначно, что снижение параметров насоса (напора, КПД) происходит из-за накопления газовых пузырьков у нерабочей стороны лопатки, где они могут объединяться, образуя газовую каверну. При увеличении объемного газосодержания на входе в насос газовая каверна увеличивает свои размеры по длине и ширине межлопаточ-



ного канала. Из-за наличия градиентов давления в потоке по ширине и длине межлопаточного канала пузырьки газа, отставая от жидкости, накапливаются у нерабочей стороны лопатки ближе к входу в рабочее колесо (явление относительного скольжения газа и жидкости). При дальнейшем увеличении газосодержания на всасывании газовая каверна у входа в рабочее колесо распространяется вдоль межлопаточного канала и в отдельных каналах может достигать рабочей стороны лопатки. Если при небольшом газосодержании структура потока в межлопаточных каналах носит в целом пузырьковый характер, то в этом случае наблюдается струйный характер течения. Газожидкостная смесь движется от входа к выходу рабочего колеса вдоль рабочей стороны лопатки, а газ вдоль нерабочей. На выходе рабочего колеса газовая зона уменьшает эффективное поперечное сечение, приводя к увеличению меридиональной составляющей абсолютной скорости. Такая структура распределения газожидкостной смеси в межлопаточном канале приводит к падению характеристик центробежного насоса.

В прямой зависимости с падением характеристик находится срыв параметров. При этом особое значение принадлежит потоку в задней боковой пазухе рабочего колеса. При малом газосодержании смесь в боковой пазухе однородная (разделения фаз не происходит). При больших значениях газосодержания вследствие перепада давления газовые пузырьки движутся к меньшему радиусу, увеличивая там местное газосодержание. Объединяясь, они образуют кольцеобразную газовую зону. Эта зона несимметричная по окружности, а ее радиус зависит от распределения давления, плотности и скоростей в боковой пазухе рабочего колеса. При дальнейшем увеличении газосодержания, газовая зона вырастает до наружного радиуса рабочего колеса и соединяется с газовой каверной из межлопаточного канала.

Следует учесть, что при работе насоса на газожидкостной смеси меняется также структура потока в корпусе насоса (обычного спирального типа). Причина изменения структуры потока заключается в асимметричном по окружности рабочего колеса истечении из него в корпус и, соответственно, в возникающих вследствие этого в корпусе мертвых зон и вихрей. Течение в корпусе оказывает решающее влияние на параметры насоса, на его КПД и определяет границы срыва потока (величину газосодержания, при котором прекращается подача насоса), но не является его причиной.

Таким образом, истинной причиной прекращения работы насоса может быть: во-первых, «запирание» газовой каверной проходного сечения канала в области входа в рабочее колесо, во-вторых, соеди-



нением двух газовых областей из межлопаточного канала и задней паузы рабочего колеса. По всей видимости, какая из причин наступит первой, зависит от конструкции насоса и его параметров.

Следует отметить, что описанный рабочий процесс центробежно-го насоса при работе на газожидкостной смеси является лишь качественной и упрощенной картиной.

### 3. Рабочий процесс свободновихревого насоса на газосодержащей смеси

Имеются различные конструктивные схемы исполнения проточной части свободновихревого насоса. Рассмотрим рабочий процесс наиболее применяемой схемы, имеющей хорошие энергетические качества – схема типа Туро. Конструкция проточной части, выполняемая по этой схеме, имеет рабочее колесо полуоткрытого типа с лопатками (обычно радиальными), утопленное в нишу. Перед рабочим колесом имеется свободное пространство, ограниченное свободной камерой с напорным патрубком.

Визуализация рабочего процесса в проточной части позволила выявить места накопления газовых пузырьков. Этими зонами являются (рис. 1): пристеночная область 1 внутренней поверхности сво-

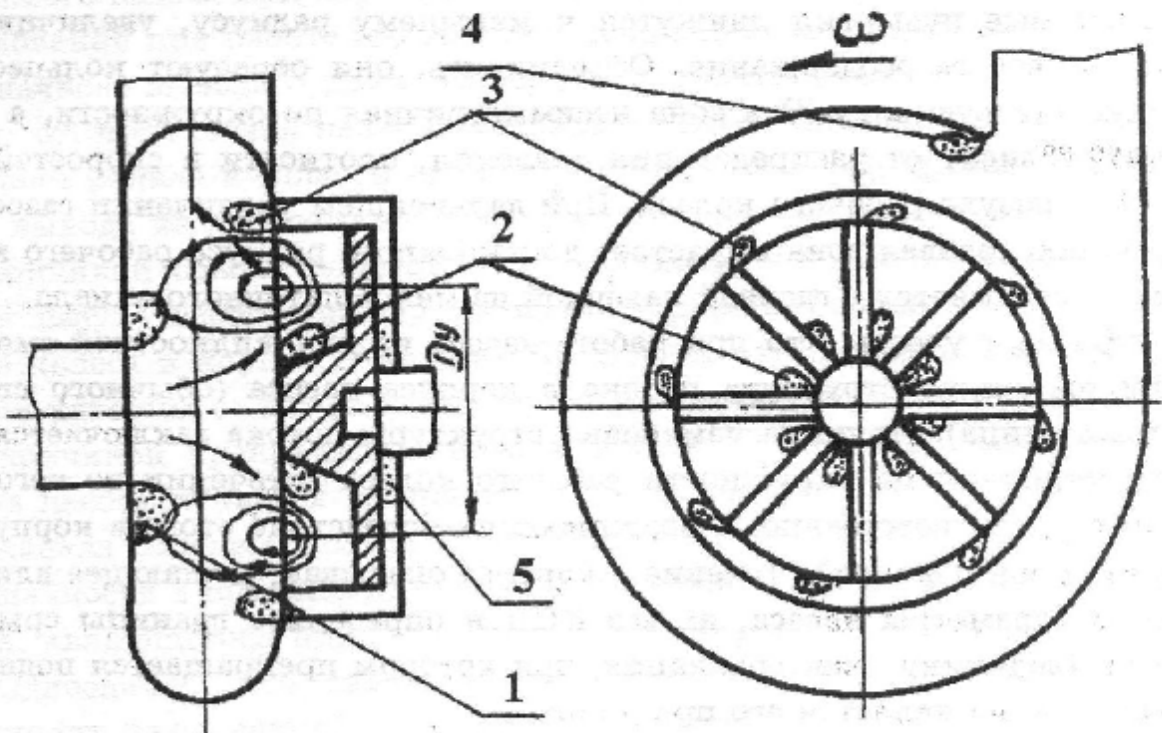


Рис.1 Зоны накопления пузырьков газа



бодной камеры со стороны всасывающего патрубка, межлопаточные каналы 2 рабочего колеса в области втулки у нерабочей поверхности лопасти, область свободной камеры у наружного диаметра рабочего колеса 3, область 4 вблизи языка отвода, область 5 задней пазухи насоса [7].

При малом газосодержании пузырьки газа поступают в насос равномерно распределенными в потоке смеси. На входе в рабочее колесо вблизи ступицы (зона 2) происходит изменение направления основного потока. В результате стеснения потока и неравномерности распределения скорости в межлопаточных каналах поток приобретает ускорение и вблизи ступицы рабочего колеса образуется зона с повышенными скоростями. В результате взаимодействия сил, действующих на пузырек газа, он движется к нерабочей стороне лопасти и к передней кромке рабочего колеса. В этом месте образуется зона с повышенным газосодержанием.

Схема рабочего процесса свободновихревого насоса аналогична рабочему процессу вихревого насоса и определяется наложением друг на друга двух вращающихся движений в свободной камере насоса: вращения вокруг оси насоса с угловой скоростью  $\omega_{ж}$  и вращения вокруг центра в меридианном сечении проточной части насоса осевой плоскостью (циркуляционный поток или кольцевой вихрь). В результате взаимодействия этих движений часть газожидкостной смеси движется к выходу из свободной камеры (в напорный патрубок). Остальная часть потока начинает вращаться по сложной спиралевидной траектории в рабочем колесе и свободной камере. Двигаясь в циркуляционном потоке пузырьки газа переходят на меньшие радиусы и накапливаются у входа в свободную камеру (зона 1) у ее передней стенки (в зоне пониженного давления).

При дальнейшем увеличении газосодержания на входе в насос во всасывающей трубе происходит разделение газовой и жидкой фаз. Газовая каверна в межлопаточном пространстве распространяется вдоль нерабочей стороны лопасти к выходу из рабочего колеса. Вся свободная камера заполняется пузырьками газа. Наибольшее их скопление наблюдается на радиусе выхода из рабочего колеса, где образуется газожидкостный жгут, вытянутый в сторону напорного патрубка. Увеличение количества впускаемого газа приводит к уменьшению окружной составляющей абсолютной скорости  $V_{u1}$ , и, соответственно, к сжатию зоны циркуляционного потока. Увеличивается радиус входа основного потока в рабочее колесо. Передача энергии про-



исходит только верхними участками лопаток. Зона циркуляционного потока начинает смещаться в свободную камеру и к выходу из насоса, уменьшаясь в размерах. В зоне 3, образованной наложением двух потоков: потока, выходящего из рабочего колеса, и потока из зазора между вращающимся рабочим колесом и неподвижным корпусом. В зоне 4 не наблюдается постоянно существующей области с газовыми пузырьками. Эти полости возникают прерывисто и уносятся набегающим потоком. При определенной величине газосодержания часть газа из верхней части всасывающей трубы направляется сразу в напорный патрубок. В зоне 5 при определенной величине газосодержания происходит сепарация газа и образуется газовое кольцо. При достижении критического значения газосодержания  $\beta_{кр}$  каверна в рабочем колесе достигает выхода из него и замыкается на рабочей стороне лопатки. Газовая каверна из области 5 достигая в своих размерах наружного диаметра рабочего колеса соединяется с зоной 3 и газовой каверной из межлопаточного канала. Зона 3 получив дополнительную дозу газа из межлопаточного канала рабочего колеса, задней пазухи насоса и всасывающего патрубка резко увеличивает свои размеры, перекрывая вход в напорный патрубок и происходит срыв параметров насоса.

#### 4. Сравнение явлений срыва параметров насосов

Из рассмотрения рабочих процессов центробежного и свободно-вихревого насосов при работе на газожидкостной смеси можно сделать вывод, что отличительные особенности в явлениях срыва параметров определяются различной конструкцией насосов и способом передачи энергии. Для центробежного насоса срыв параметров определяется рабочим колесом и решающим моментом является смыкание газовой каверны из межлопаточного канала и задней пазухи насоса. И определяющим является задняя пазуха насоса, так как при удалении газа из нее величина критического газосодержания увеличивается [2]. В отличие от свободновихревого в центробежном насосе весь газосодержащий поток из всасывающего патрубка попадает в рабочее колесо и газовые пузырьки быстро накапливаются там. Свободновихревое колесо «само» регулирует условие входа в него. Всегда существуют верхние участки лопаток, которые осуществляют передачу энергии. Интенсивный вихревой обмен между рабочим колесом и потоком в свободной камере не позволяет сразу образовываться ус-



тойчивым газовым кавернам. До перекрытия входа в напорный патрубок часть газа минуя рабочее колесо сразу направляется в напорный патрубок. Согласно [3] в интервале газосодержания 0,2-0,3 подача насоса растет, а напор остается неизменным. Поэтому, от потока сформированного всасывающим патрубком зависит скорость падения параметров и, по всей видимости, величина критического газосодержания. Для центробежного насоса условия во входном патрубке не влияют на падение параметров и их срыв [6]. Все вышесказанное и определяет различную величину критического газосодержания для центробежного и свободновихревого насосов.

#### Список использованной литературы:

1. Furukawa A., Sato S., et al. Some Experiments on Improving the Liquid/Gas Two-phase Flow Performance of a Centrifugal Pump / ж-л Кюсю дайгаку когаку сеохо. Technology Reports of Kyushu University, - 1990, - Vol. 63, № 5, - P. 535-542. 2. Конструкции центробежных насосов для подачи жидкостей с высоким газосодержанием / ВЦП. - № М-16078. - Пер. ст. Kosmowski I. из журн.: British Pump Manufacturers' Association. Technical Conference. - Cambridgs. - 1983. - № 8. - P. 159-169. 3. Сапожников С.В. Перекачивание газожидкостных смесей динамическими насосами // Праці II Респуб. наук.-техн. конф. "Гідроаеромеханіка в інженерній практиці". - Черкаси: ЧІТІ, 1998. - С. 81-86. 4. Петров В.И., Чебаевский В.Ф. Кавитация в высокооборотных центробежных насосах. - М.: Машиностроение, 1982. - 192 с. 5. Изменение рабочих характеристик и характера потока центробежных насосов при впуске воздуха / ГП НТБ. № 75/46312. - Пер. ст. Murakami M. и др. из журн. Нихон кикай гаккай ромбунсю. т. 39, № 328. - 1973. - P. 3715-3724. 6. Анализ условий работы центробежного насоса, перекачивающего жидкости, содержащие газ. / БелНИИНТИ. № 542/3.-Пер.ст. Kosmowski I., Steinhheimer K.-H. из материалов конф.: Conference on Fluid Machinery (7, 1983, Budapest) Proceeding., Vol.1, - P. 458-466. 7. Котенко А.И., Сапожников С.В. Сопоставление процесса кавитации с режимами течения газожидкостных смесей в свободновихревом насосе // Труды 8-й Международной научно-технической конференции "Насосы-96", т.1. - Сумы: ИПП "Мрія" ЛТД, 1996. - С. 347-353.



Родин П.Р., Герасимчук Е.М. Геометрия задней поверхности торцовых фасонных затыллованных фрез. . . . .	3
Боронко О.А. Решение задачи изгибных колебаний пластинок с учетом несовершенной упругости в материале при кинематическом возбуждении. . . . .	6
Гавриш А.П., Солдатенко Л.А., Гавриш О.А. Остаточные напряжения абразивной обработки в поверхностных слоях магнитных головок. . . . .	10
Равская Н.С., Николаенко Т.П. Формообразование фасонных поверхностей торцовыми фрезами на станках с ЧПУ .	16
Белонос С.М., Яхно О.М. Граничные интегральные уравнения теории потенциалов в некоторых задачах гидравлики. . . . .	22
Коробко І.В. Розробка математичної моделі течії рідини при швидкозмінних (імпульсних) режимах потоку. . . . .	28
Ковальчук Б.І., Стеблюк В.І., Орлюк М.В., Роцина І.А. Визначення механічних властивостей сталі 11ЮА та оцінка точності апроксимації її діаграми зміцнення деякими функціями. . . . .	34
Струтинский В.Б., Гуржий А.М., Лопаткина Н.Н. Математическая модель случайного процесса позиционирования прецизионного механического. . . . .	42
Родин Р.П. Тангенциальные фасонные резцы с наклонным движением подачи. . . . .	48
Зенкин Н.А. Повышение долговечности деталей машин легкой промышленности. . . . .	51
Линкин Г.А., Линкин А.Г. Современные технические системы интенсификации разработки и подготовки производства пластмассовых изделий сложных форм. . . . .	54
Якимчук Г.К., Мовчан В.Н. Методика исследования и измерения вибраций при обработке цилиндрических зубчатых колес набором дисковых обкаточных фрез. . . . .	60
Дусматов О.М., Яворский А.Е. Моделирование и расчет динамики виброгасителя методом графов связи. . . . .	65
Петраков Ю.В., Халид Абу Эль Хусейн. Управление контурным шлифованием на станках с ЧПУ. . . . .	71



Луговський О.Ф., Чорний В.І. Методика розрахунку ультразвукового диспергатора з радіально-згинними коливан- нями до системи підготовки паливно-повітряної суміші. . . . .	79
Радченко С.Г., Проблемы принятия формализованных ре- шений в технологических исследованиях. . . . .	88
Кальченко В.В. Формообразование игл барабанов тек- стильных машин торцами двух ориентированных шлифоваль- ных кругов. . . . .	95
Редько Р.Г. Исследование предельных возможностей за- жимных цанг. . . . .	98
Гришанова І.А., Коробко І.В. Визначення характери- стичної залежності турбінних лічильників газу. . . . .	100
Роик Т.А. К вопросу о применении порошковых отходов для высокотемпературных узлов трения. . . . .	105
Струтинский В.Б., Шевченко А.В., Даниленко А.В., Джаалук Али. Исследование виброакустических характери- стик токарно-винторезных станков. . . . .	112
Кузнецов І.Б. Нові підходи до діагностики стадії попе- реднього руйнування металеві поверхні при експлуатації і ремонті складних технічних об'єктів. . . . .	122
Пшенишнюк А.С. Уменьшение расхода энергии при штамповке кольцевых деталей. . . . .	125
Губарев А.П., Литвиненко Д.В. Структурный синтез и минимизация выражений управляющих команд. . . . .	129
Турусбеков Е.Т. Втомна міцність елементів мета- лорізальних верстатів при нестационарному навантаженні. . . . .	136
Гавриш А.П., Мохан Сринивасан. Обеспечение парамет- ров изделий из магнитных материалов при алмазном и бора- зоновом шлифовании. . . . .	142
Солодкий В.И. Ладыжев А.Л. Профилирование инстру- мента для обработки винтовых геликоидальных поверхностей. . . . . .	145
Бугай В.Ю. Схема срезания припуска и анализ загрузки режущих кромок перовых сверл. . . . .	150
Стоялов В.М. К вопросу о термическом уравнении со- стояния идеального газа. . . . .	155



Гордеев А.Ф. Оптимизация параметров гидростатических опор на стадии проектирования по демпфирующей способности. . . . .	160
Дмитрієв Д.О. Вплив обробки поверхневим пластичним деформуванням в полімервмісних мастильно-охолоджуючих технологічних засобах (МОТЗ) на корозійну стійкість металевих виробів. . . . .	163
Кальченко В.В. Заточка игольчатой поверхности периферией и торцом ориентированного круга. . . . .	162
Стеблюк В.И. Распределение радиальных напряжений по очагу деформации при осесимметричной вытяжке из изотропной заготовки с экспоненциальным законом упрочнения. . . . .	173
Марков В.В., Формообразование винтовых поверхностей торцовыми фрезами. . . . .	180
Родин П.Р., Парненко А.А. Определение формы режущей кромки и установки обкаточной фрезы, обеспечивающей обработку без переходных кривых деталей с наклонным зубом при наклонных осях заготовки и фрезы. . . . .	185
Боронко О.А. Программный комплекс решения задачи динамического состояния дисковой пилы при кинематическом возбуждении ее изгибных колебаний. . . . .	189
Луговський О.Ф. Отримання дрібнодисперсного аерозолу шляхом ультразвукового диспергування. . . . .	193
Даниленко А.В. Проверка адекватности методик расчета погрешностей кинематических цепей станочного оборудования с учетом их случайных составляющих. . . . .	202
Солодкий В.И. Фасонные торцевые фрезы с конической передней поверхностью. . . . .	208
Губарев А.П. О количестве элементов памяти в дискретных системах управления гидропневмоавтоматики. . . . .	212
Майборода В.С. Вплив магнітно-абразивної обробки на стан поверхневого шару лопаток газотурбінних двигунів. . . . .	217
Козачок А.А., Яхно О.М. Об одном подходе к задачам гидродинамической теории смазки. . . . .	222
Кривда Л.Т., Гожий С.П. Определение кинематических и энерго-силовых параметров штамповки обкатыванием деталей с относительно тонким фланцем. . . . .	229
Мамедов Н.М., Таурит Т.Г. Особенности течения аномально вязких жидкостей в каналах с внутренним покрытием. . . . .	234



Струтинский В.Б., Лопаткина Н.Н. Расчет статистических характеристик точности позиционирования прецизионного механического привода. ....	241
Корбут Е.В. Заточка сверл с вогнутыми режущими кромками. ....	248
Ромашко А.С. Методика расчета точности клиновых сверлильных патронов. ....	257
Родин Р.П., Хмелева В.С. Геометрические параметры режущей части дисковых пил. ....	259
Кривда Л.Т., Гожий С.П. Технологические возможности штамповки обкатыванием при изготовлении деталей с относительно тонким фланцем. ....	265
Клюшниченко В.Н., Рудик А.В., Кальченко В.В. Расчет износа профиля ориентированного круга. ....	268
Николаенко Т.П. Формообразование конических поверхностей. ....	270
Халид Абу Эль Хусейн. Анализ процесса формообразования при многопроходном врезном контурном шлифовании	272
Титов В.А., Яворовский В.Н., Герасимов О.В. Определение радиуса нейтральной поверхности в зоне изгиба при вытяжке биметаллических композиционных материалов. ....	278
Марков В.В. Графо-аналитическое профилирование торцовых резьбонарезных фрез. ....	285
Гапонюк И.Н. Параметрический вибровозбудитель колебаний. ....	287
Гейчук В.М., Костенко А.В., Майборода В.С. Применение магнитно-абразивной обработки для ремонта лопаток компрессоров газотурбинных двигателей. ....	290
Скляр Р.А. База данных для прогнозирования развитию пожарных автоматів: структура та формування. ....	299
Пшенишнюк А.С. Эффективное использование установленной мощности оборудования для штамповки обкатыванием.	304
Мишунин Б.И., Глоба А.В. Современные методы обработки композиционных материалов. ....	307
Хмелева В.С. Толщина среза при работе отрезными фрезами. ....	315
Зінченко В.П., Зінченко Н.П. Методика проектування трішньомодельних тензовагів. ....	319



Кривда Л.Т., Мухаммед Хурани. Использование САПР в разработке групповых техпроцессов вытяжки. . . . .	329
Евтушенко А.А., Гусак А.Г., Бурлака В.Б. Задача создания нового поколения капсульных осевых насосов. . . . .	334
Финкельштейн З.Л., Твердохлеб И.Б., Лилак Р.Н. Повышение качества работы динамических насосов системы ППД нефтяных месторождений. . . . .	342
Евтушенко А.А., Соляник В.А. Рабочий процесс свободновихревого насоса типа "TURO". . . . .	346
Сапожников С.В. Общее и отличное в явлении срыва параметров при критическом газосодержании в центробежном и свободновихревом насосах. . . . .	355
Рокая К.Б. Математическое моделирование аппарата биофильтрации. . . . .	362