

АЛЕКСАНДР ИЛЬИН, ВЯЧЕСЛАВ КАЛЕКИН, ДМИТРИЙ КАЛЕКИН*,
ВАЛЕРИЙ ПЛОТНИКОВ**

ГИДРОДИНАМИКА ЦЕНТРОБЕЖНО-БАРБОТАЖНЫХ ГАЗООХЛАДИТЕЛЕЙ КОНТАКТНОГО ТИПА

THE HYDRODYNAMICS OF CENTRIFUGAL-FOAM APPARATUSES FOR DIRECT GAS COOLING

Аннотация

В этой статье описывается разработка центробежных пенообразователей (CFA) для прямого газового охлаждения. Отсутствие смазки в сжатом газе позволяет рассматривать этот метод охлаждения, как довольно перспективный. Различные жидкофазные и газовые динамические процессы исследовались на CFA с различными углами раскрытия краевых элементов. Рассмотрены и изучены: гидравлические сопротивления газовой стадии, границы устойчивого функционирования пенообразователя: варианты со „спадом” жидкости, когда газовый поток недостаточен; „захлебывание” конического элемента контакта с жидкостью с более низкой подачей и „подвисанием” жидкости с более высокой подачей газа на элементе контакта. Гидродинамические модели CFA категоризированы. Результаты эксперимента интерпретируются как безразмерная функциональная зависимость.

Ключевые слова: центробежно-барботажный пенный аппарат, прямое охлаждение газа, гидродинамика, газовый поток, контактный элемент

Abstract

This paper describes design of centrifugal-foam apparatuses (CFA) for direct gas cooling. The absence of lubricant in compressed gas allows considering this method of cooling rather perspective. Different liquid and gas dynamic processes have been researched on CFA with different angles of contact element openings. Hydraulic resistances of gas phase are defined, borders of stable functioning are detected: modes with “fall-off” of liquid though holes of perforation of contact element when gas flow is insufficient, “drowning” of conic contact element with liquid with lower feed and “hanging” of liquid with higher feed of it on contact element. Hydrodynamic CFA modes are categorized. Experiment results are interpreted as non-dimensional functional dependence.

Keywords: centrifugal-foam apparatus, direct gas cooling, hydrodynamics, gas flow, contact element

* Аспирант Александр Ильин, д.т.н. профессор Вячеслав Калекин,

аспирант Дмитрий Калекин, Омский Государственный Технический Университет.

** К.т.н. доцент Валерий Плотников, Кузбасский Государственный Технический Университет.

Основная доля теплоты сжатия в компрессорах (до 90%) отводится в межступенчатых и концевых холодильниках, поэтому именно они представляют существенный интерес для исследований с целью совершенствования систем охлаждения, способствуя при этом повышению безопасности их работы и долговечности. От эффективности работы систем охлаждения зависят эксплуатационные характеристики и удельные весогабаритные показатели компрессорных установок. Интенсификация процессов теплообмена ставит задачу поиска новых эффективных систем охлаждения сжимаемого газа, новых технических решений, которые позволили бы увеличить удельные тепловые потоки с охлаждаемых объектов [1, 2].

Высокая интенсивность теплообмена, снижение потребления охлаждающей воды компрессорами может достигаться применением непосредственного контакта сжимаемого газа с теплоносителем. Эффективными и простыми по принципу действия являются осевые барботажно-пенные аппараты, но они имеют существенный недостаток – повышенный брызгоунос при скоростях вдува газа 2–2,5 м/с [3].

Использование вращающегося двухфазного слоя в барботажно-пенных аппаратах позволяет существенно снизить степень уноса жидкости, доведя его до безопасного уровня. Кроме того, аппараты вихревого типа имеют дополнительные преимущества перед осевыми. Это создание развитой поверхности теплообмена, многократное использование жидкой фазы, возможность регулирования времени пребывания в зоне фазового контакта.

Исследованию контактных аппаратов осевого типа посвящены многие работы [4], в которых обобщены результаты гидравлических и тепловых испытаний, даны рекомендации по их проектированию. Аналогичные результаты для вихревых контактных аппаратов ограничены и даже носят противоречивый характер [5]. Следует также отметить, что аппараты с непосредственным контактом сжимаемого газа с жидким теплоносителем пока еще не получили применения в качестве межступенчатых и концевых теплообменников компрессорных установок.

В связи с тем, что интенсивность и эффективность процессов тепло-массообмена в основном определяется гидродинамикой при взаимодействии потоков жидкой и газообразных фаз, авторами были проведены экспериментальные исследования центробежно-барботажного (пенно-вихревого) аппарата, защищенного Патентом России [6].

Целью настоящих экспериментальных исследований являлось установление области устойчивой работы, определение формы и вида аналитических зависимостей для расчета гидравлических сопротивлений аппарата.

Описание конструкций исследованных аппаратов и экспериментальных стендов приведено в [7, 8]. Вращающийся пенно-вихревой слой в аппарате создается на внутренней поверхности контактного устройства, представляющего обратный усеченный перфорированный конус, размещенный внутри цилиндрической вихревой камеры. Ввод газа в вихревую камеру производится тангенциально. Открытая сверху часть конуса выступает над торцевой крышкой вихревой камеры. В крышке по периметру размещены циркуляционные трубы, по которым снизу или сверху в зависимости от способа подачи обеспечивается течение жидкости.

В одном из экспериментальных стендов аппарат был выполнен из оргстекла. В состав стенда входила центробежная воздуходувка и центробежный насос. Регулирование температур воды и воздуха обеспечивалось электронагревателями.

Снимались показания расходов газа и жидкости, перепадов давлений, влажности воздуха, температур жидкости и циркулирующего воздуха. Объем и форма пенно-вихревого слоя определялись с помощью измерительной гребенки, размещенной на координатном устройстве.

В результате экспериментальных исследований установлены границы устойчивой работы аппарата при различных способах подачи жидкости на контактное устройство. Имели место режимы «провала» жидкости через отверстия перфорации при недостаточном расходе газа при нижней и верхней подаче. В связи с невозможностью обеспечить расход жидкости, стекающей по циркуляционным трубам с крышки вихревой камеры аппарата, наступали режим «затопления» полуконического контактного устройства при нижней подаче жидкости и «подвисания» при верхней подаче жидкости.

На рис. 1 и 2 приведены результаты исследований в безразмерных координатах гидродинамики аппарата для режимов «провала» и «затопления» при нижней подаче жидкости.

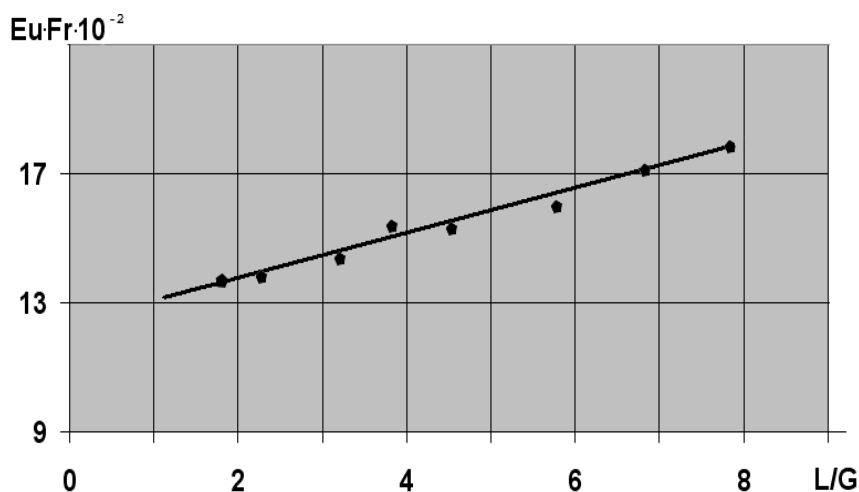


Рис. 1. Режим «провала» жидкости на контактном элементе:

$Eu = 2\Delta p_{кр} / (\rho w_z^2)$; $Fr = w_z^2 / (2gH \sin \alpha)$; $\Delta p_{кр} = \rho_{г-ж} gH \sin \alpha$; w_z – скорость газа в отверстиях перфорации; H , α – высота и угол раскрытия обратного полуконического контактного элемента; $\rho_{г-ж}$ – плотность газожидкостной системы; L , G – массовые расходы жидкости и газа, соответственно

Fig. 1. Regime of liquid "fall-off" on contact element

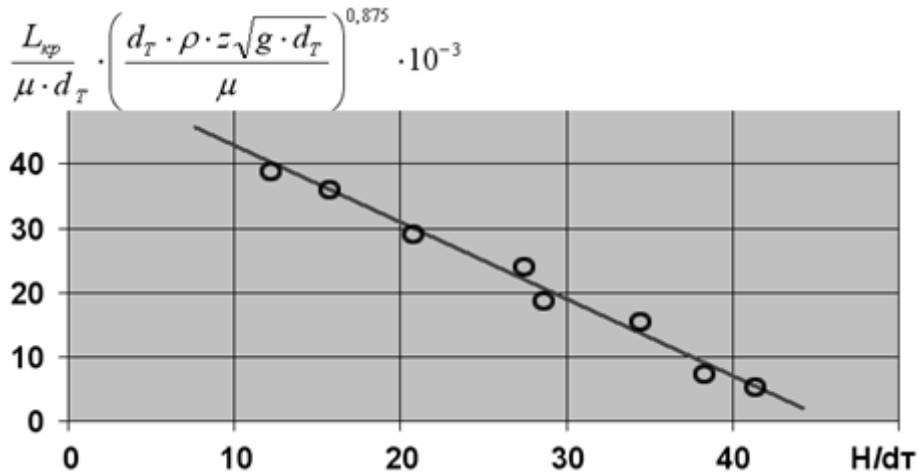


Рис. 2. Режим «затопления» контактного элемента:

$L_{кр}$ – критический (максимальный) расход жидкости при затоплении; ρ , μ – плотность и динамический коэффициент вязкости жидкости; d_m , z – диаметр и число циркуляционных труб аппарата, соответственно

Fig. 2. Regime of „flooding” for contact element

В ходе проведения экспериментов измерялась степень заполнения конуса $\psi = V_{сл}/V_k$ и определялось объемное газосодержание $\phi = V_n/V_{сл}$ ($V_{сл}$, V_k , V_n – объемы слоя, усеченного конуса и газовых пузырей соответственно). Результаты обработки экспериментальных данных были представлены в виде зависимости $\phi = f(\psi)$ при различных значениях параметра L/G . Один из таких графиков при нижней подаче жидкости на контактное устройство приведен на рис. 3.

Для режима *провала* характерны высокая степень заполнения конуса и низкое газосодержание. По мере увеличения расхода по газу структура слоя изменяется, появляется зона барботажа, часть активного объема конуса занимает пена. При дальнейшем увеличении расходов по газу и жидкости зона барботажа несколько уменьшается. Слои пены при этом вращаются с большей скоростью и под действием центробежных сил распределяются по поверхности конуса, образуя пенно-вихревой слой. Степень заполнения конуса пенным слоем и газосодержание снижаются, однако под действием центробежных сил происходит уменьшение среднего размера пузыря, что приводит к значительному увеличению поверхности контакта фаз. Границам *пенно-вихревого* режима соответствуют значения параметра $\psi = 0,95-0,4$.

При дальнейшем увеличении расходов и значениях $\psi < 0,4$ наблюдается разрушение пенно-вихревого слоя с образованием газожидкостной аэрозоли, наступают не достаточно эффективные для тепло-массообменных процессов пенно-аэрозольный и аэрозольный режимы.

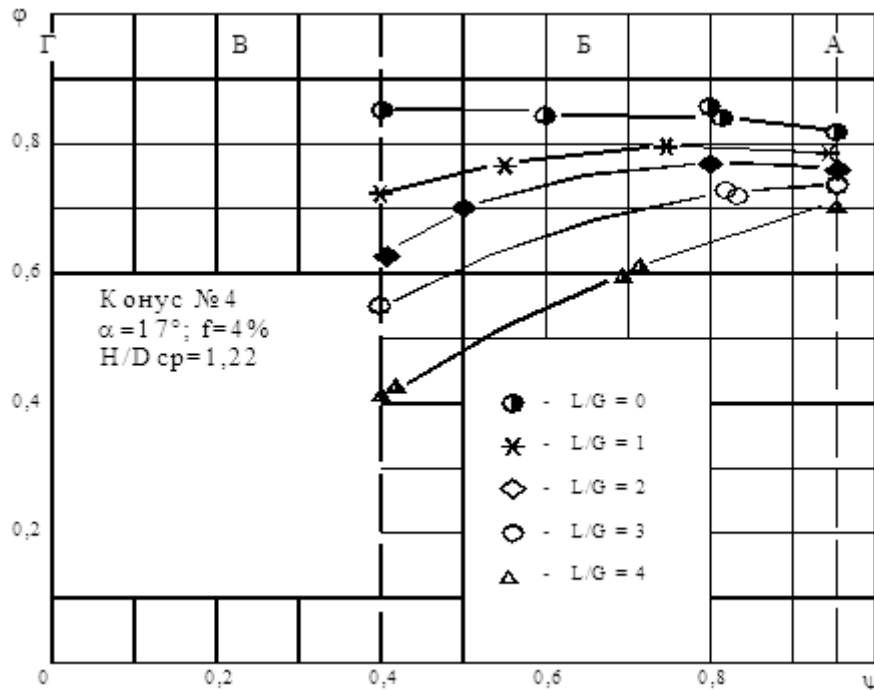


Рис. 3. Карта режимов работы для одного из вариантов пенно-вихревого аппарата при нижнем орошении: А) – провал; Б) – пенно-вихревой; В) – пенно-аэрозольный; Г) – аэрозольный

Fig. 3. The map of work regimes for one of variants centrifugal-barbotage apparatus near bottom spraying

В пенно-вихревом режиме работы аппарата достигается наибольшая поверхность контакта фаз, пропорциональная объему пенно-вихревого слоя

$$F = a_{ca} V_{ca} \quad (1)$$

В свою очередь удельная поверхность контакта фаз равна

$$a_{ca} = 6\phi / d_n \quad (2)$$

средний диаметр газового пузыря

$$d_n \approx \sqrt{\sigma / [g^* (\rho_{жс} - \rho_n)]} \quad (3)$$

центробежное ускорение вращающегося слоя

$$g^* = w_{cp}^2 / (D_{cp} / 2) \quad (4)$$

где σ , w_{cp} , D_{cp} – коэффициент поверхностного натяжения, средняя скорость вращения и диаметр конуса, соответственно.

Эффективность работы аппарата в пенно-вихревом режиме может быть оценена по величине удельных энергозатрат на создание поверхности контакта фаз пенно-вихревого слоя

$$E = \Delta p_a \cdot V_G / F = \min \quad (5)$$

В результате испытаний были классифицированы три гидродинамических режима: подвисяния, барботаж, пенно-вихревой. По своей структуре пенно-вихревые режимы при нижнем и верхнем орошении аналогичны, однако газосодержание при подаче жидкости сверху выше, но поверхность контакта фаз меньше, что связано с более медленным вращением пенного слоя. Границам пенно-вихревого режима соответствуют значения параметра $\psi = 0,2-0,4$.

Обработка результатов экспериментов проводилась с применением методов теории подобия. Полученные данные можно распространять на физически подобные процессы и геометрически подобные аппараты, характеризуемые равенством определяемых и определяющих критериев подобия [9].

Экспериментальные данные для рабочих режимов аппарата представлены в виде зависимостей критериев Эйлера, Рейнольдса, Фруда. За определяющий размер в критериях принимался эквивалентный диаметр отверстия перфорации конуса. За определяющую скорость – скорость газа в отверстии. В качестве определяющей температуры, от которой зависели физические свойства газовой фазы, принималась средняя температура воздуха между входом и выходом из аппарата.

Как было установлено из экспериментов сопротивление аппарата в области устойчивой работы при верхней подаче на 30–40 % ниже, чем при нижней, что связано со снижением затрат энергии на подъем жидкости. При нижнем "орошении" аппарат работает более устойчиво и в более широком диапазоне нагрузок по газу, чем при верхнем [8].

Влияние угла раскрытия обратного конуса при обработке экспериментальных данных было учтено безразмерным критерием Фруда и симплексом геометрического подобия (отношением диаметров D_{cp}/d_3). Обобщенная критериальная зависимость при нижней подаче жидкости имеет вид [7]

$$Eu = 2,4 \cdot 10^6 \cdot Re^{-1} \cdot Fr^{-0,27} \cdot (D_{cp} / d_3) \quad (6)$$

Было установлено, что в исследованной области плотность орошения L/G оказывает влияние на характер движения двухфазного вращающегося слоя. В критериальную зависимость для расчета гидравлических сопротивлений также

необходимо вводить безразмерный параметр – относительную поверхность перфорации $f = F_{ome} / F_k$.

На основании проведенных исследований можно заключить, что в целом обобщенная зависимость для аппаратов исследованного типа может иметь вид

$$Eu = A \cdot Re^n \cdot Fr^m \cdot (D_{cp} / d_o)^p \cdot (L / G)^k \cdot f^t \quad (7)$$

Для установления конкретных значений постоянных величин A , n , m , p , k , и t необходимы дальнейшие исследования.

На основании экспериментальных исследований были получены следующие результаты: проведена классификация газо-жидкостных режимов работы пенно-вихревого аппарата; установлены диапазоны устойчивой работы, величины гидравлических сопротивлений; предложена форма аналитической безразмерной зависимости для расчета гидравлических сопротивлений; усовершенствована конструкция пенно-вихревого аппарата. В усовершенствованной конструкции [10] учтены недостатки аппарата [6], а именно: исключены переточные трубки для циркуляции жидкости; вихревая камера выполнена по спирали, что позволяет обеспечить равномерное распределение газовой фазы по отверстиям перфорации обратного конуса, уменьшить гидравлические сопротивления, расширить диапазон устойчивой работы.

Для проведения дальнейших исследований был изготовлен пенно-вихревой аппарат, вошедший в состав экспериментального стенда с двухступенчатым воздушным компрессором двойного действия без смазки цилиндров 2ВУ-0,6/16 (ЗАО «Барренс», г. Санкт-Петербург).

Разработана математическая модель рабочего процесса двухступенчатого поршневого компрессора двойного действия с промежуточным вихревым холодильником, включающая фундаментальные уравнения сохранения энергии, массы, неразрывности потока, состояния, динамики движения запорных органов. Расчет температур теплоносителей на выходе из холодильника производился с использованием полученных эмпирических зависимостей. Промежуточное давление рассчитывалось по апробированной методике с использованием метода Ньютона [11].

Цель экспериментальных и теоретических исследований связана с анализом влияния промежуточного охлаждения поршневого компрессора без смазки на рабочий процесс, установлением рациональных режимных и геометрических параметров пенно-вихревых холодильников, выдачей рекомендаций для разработки конструкций контактных холодильников для компрессоров общепромышленного назначения.

Литература

- [1] Кабаков А.Н.: *Охлаждение сжатого воздуха в компрессорных установках*, Изв. ТПИ им. С.М. Кирова, Т. 162, 1967, 244-246.
- [2] Куцепаленко В.Ф., Кабаков А.Н., Тихонов Б.А.: *Повышение эффективности охлаждения сжатого воздуха в компрессорах*, Изв. ТПИ им. С.М. Кирова, Т. 229, 1972, 116-121.
- [3] Таубман Е.И., Горнев В.А., Мельцер В.Л. и др.: *Контактные теплообменники*, М.: Химия, 1987, 256.
- [4] Мухленов И.П., Тарат Э.Я., Туболкин А.Ф., Тумаркина Е.С.: *Пенный режим и пенные аппараты*, Л. Химия, 1977, 304.
- [5] Богатых С.А.: *Циклонно-пенные аппараты*, Л.: Машиностроение, 1978, 224.
- [6] Бенедиктов А.В., Калекин В.С., Плотников А.А. и др.: *Центробежно-барботажный аппарат*, Пат. 2069080 России, Бюл., № 32, 1996.
- [7] Калекин В.С., Ломова О.С., Плотников В.А.: *Исследование вихревых контактных холодильников компрессорных установок*, Вестн. Куз. ГТУ, № 3, 2002, 43-46.
- [8] Калекин В.С., Ломова О.С., Плотников В.А.: *Исследование гидродинамики контактных теплообменников компрессорных установок*, Компрессорная техника и пневматика, № 1-2, 1998, 60-64.
- [9] Кирпичев М.В.: *Теория подобия*, М.: Мир, 1953, 95.
- [10] Калекин В.С., Ильин А.В., Калекин В.В., Калекин Д.В.: *Центробежно-барботажный аппарат*, Пат. 2261138 России, Бюл., № 27, 2004.
- [11] Калекин В.С., Ваняшов А.Д., Плотников В.А.: *Расчет поршневых многоступенчатых компрессорных машин и детандер-компрессорных агрегатов методом математического моделирования*, Вестн. Куз. ГТУ, № 5, 1999, 10-13.