

Е. М. Краева, М. В. Краев, А. В. Пекарский

ПОВЫШЕНИЕ КАВИТАЦИОННЫХ КАЧЕСТВ НАСОСНОГО АГРЕГАТА ЖИДКОСТНОГО РАКЕТНОГО ДВИГАТЕЛЯ ПРИ ПОДАЧЕ КРИОГЕННЫХ КОМПОНЕНТОВ ТОПЛИВА *

Рассмотрены особенности насосных агрегатов жидкостных ракетных двигателей (ЖРД) при подаче жидкого водорода. На основе визуальных исследований и измерений параметров потока в проточной части полуоткрытого рабочего колеса насоса малой быстроходности изложены преимущества для подачи жидкого водорода.

Ключевые слова: кавитация, насосный агрегат, рабочее колесо, полуоткрытое колесо, подача, водород.

Накопленный в отечественном ракетном двигателестроении практический опыт разработки насосных агрегатов ЖРД обусловил принятие конструктивных решений преимущественно с закрытыми рабочими колесами (РК). При подаче рабочих тел перед высоконапорной центробежной ступенью устанавливается низконапорная бустерная ступень, обеспечивающая заданные кавитационные качества насосного агрегата [1; 2]. Развитие ракетной техники характеризуется необходимостью использования жидкого водорода в качестве горючего для жидкостных ракетных двигателей.

Водород обладает рядом особенностей теплофизических свойств, таких как относительно низкая плотность и высокая сжимаемость в жидком состоянии, высокая теплоемкость и существенная зависимость ее от температуры и плотности, низкая температура сжижения, узкий температурный диапазон существования в жидком состоянии и т. д. Эти свойства водорода, существенно отличные от соответствующих свойств компонентов топлива, в том числе и криогенных, применяемых в ракетной технике, обусловили необходимость решения ряда новых инженерных и научных проблем, связанных с созданием производственной базы, средств хранения и транспортировки, средств испытаний двигателей и отдельных его агрегатов, а также двигателей и ракетных ступеней. Так, например, напорные характеристики водородных насосов имеют возрастающие ветви при любом виде напорной характеристики, получаемой на несжимаемой жидкости. Ограничен диапазон работоспособности водородных насосных агрегатов по расходу малых величин [3].

В составе насосных агрегатов ЖРД малой тяги и энергоустановок летательных аппаратов используются центробежные высокооборотные насосы при угловой скорости ротора до 10 000 рад/с при широком диапазоне изменения режимных параметров по расходу \dot{V} и напору H . Малое значение расходов в таких насосах наряду с высокой угловой скоростью ротора ω приводит к снижению параметра \dot{V}/ω , т. е. обычно меньше значения $(\dot{V}/\omega) = 1 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$, предельно допустимого для насоса с закрытым рабочим колесом и значением коэффициента быстроходности $n_s < 50$ [2].

В работе [4] показано, что кавитационные качества низконапорных ступеней лопастных насосов при перека-

чивании криогенных жидкостей значительно лучше, чем при работе на воде, что учитывается с помощью термодинамической поправки Δh_T к критическому кавитационному запасу насоса при работе на модельной жидкости $\Delta h_{кр.м}$:

$$\Delta h_{кр} = \frac{p_{вх.кр} - p_{п}}{\rho_{ж}} + \frac{c_{вх}^2}{2} = \Delta h_{кр.м} - \Delta h_T, \quad (1)$$

где $\Delta h_{кр}$ – критический кавитационный запас насоса при работе на натурной жидкости; $p_{вх}$, $c_{вх}$ – давление и скорость потока на входе в насос, соответственно; $p_{п}$ – упругость насыщенных паров жидкости.

В случае работы бустерных насосов ЖРД на жидком водороде значение Δh_T может быть больше величины $\Delta h_{кр.м}$, что позволяет удовлетворительно перекачивать насосом жидкий водород в кипящем состоянии [1]. Однако эта закономерность чаще всего не подтверждается применительно к основным высоконапорным насосам ЖРД, особенно при их работе на жидком водороде, когда велик градиент изменения упругости насыщенных паров в зависимости от температуры. Если такие насосы имеют низкий коэффициент быстроходности n_s , то их кавитационные качества на водороде могут быть значительно хуже, чем на воде [5].

Таким образом, для насосов с закрытым рабочим колесом кавитационные качества при работе на водороде существенно ниже, чем при работе на воде, причем они снижаются с ростом числа оборотов вала насоса и повышением температуры водорода. Такое поведение параметров связано с влиянием сброса нагретых во вспомогательном тракте насоса утечек рабочего тела во входной участок насоса. Утечки, поступающие через переднее уплотнение насоса или другие вспомогательные каналы не успевают полностью перемешаться с основным потоком и образуют на входе в рабочее колесо закрытого типа локальную нагретую область, в которой упругость насыщенных паров $p_{п.ут}$ утечек существенно больше упругости насыщенных паров в основном потоке $p_{п}$. И тогда кавитационный срыв режима работы насоса определяется расходом утечек, поступающих в основной поток в этой области. В работе [5] отмечается, что только в ряде зарубежных кислородо-водородных ЖРД (двигатель RL-10 (США) и НМ-7 (Франция)) проблем по кавитационным качествам нет, так как в насосе применяется полуоткрытое РК.

* Работа выполнена при поддержке грантов: АВЦП РПН ВШ № 2.1.2/802, Президента РФ № МК–1115.2010.8.

С целью уточнения основных особенностей гидродинамики в каналах полукрытого РК и оценки подогрева рабочей жидкости проведен ряд экспериментов, в том числе и по визуализации течения в проточной части таких насосов.

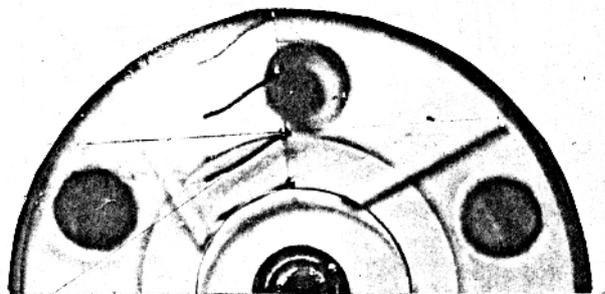


Рис. 1. Флюгерки в зазоре между торцами лопаток полукрытого РК и корпусом насоса при $\omega = 1047$ рад/с

Фотографирование наклеенных флюгерков на стенке между корпусом насоса и открытыми лопатками РК (рис. 1) при испытании в широком диапазоне изменения режимных параметров насоса ($\dot{V} = 0 \dots 1,5 \dot{V}_{\text{ном}}$) и изменении осевого зазора от 0,5 до 3 мм показало, что для различных радиусов соблюдается постоянство отношения радиальной составляющей скорости V_r от окружной:

$V_r/U = \varphi_r$. Это дает основание выразить скорость радиального течения в осевом зазоре от периферии РК к центру, с учетом коэффициента скольжения потока φ_d в окружном направлении относительно РК следующим образом:

$$V = U\varphi_r = UK_r\varphi_d, \quad (2)$$

где K_r – экспериментальная константа, $K_r = 0,45$.

В дополнение к опытам по визуализации течения в межлопаточных каналах (см. рис. 1) для уточнения структуры потока в РК полукрытого типа проводились опыты с измерением полей давления по радиусу модельного РК. Трубки отбора давлений имели толщину стенки 0,15 мм с внутренним диаметром 0,75 мм. Ввиду того, что осевая составляющая скорости в осевом зазоре очень мала по сравнению с другими ее компонентами, то тип насадки выбирался с учетом измерения не полной скорости, а только суммы ее окружной и радиальной составляющих, что позволило остановиться на более простых ее конструктивных формах.

Измерение параметров потока в осевом зазоре с лопаточной стороны РК проводилось дифманометром типа ДТ-50. При испытании одна полость дифманометра соединялась с трубкой отбора статического давления, вторая – с трубкой полного давления, расположенной на том же радиусе. Трубку полного давления можно было устанавливать в разных направлениях и перемещать в осевом зазоре. При измерении она устанавливалась в направлении максимального значения перепада давления и по известному углу наклона определялась величина радиальной составляющей скорости потока. Обработка полученных данных показала, что для различных радиусов РК соблюдается постоянство отношения радиальной составляющей скорости от окружной.

Опытные данные изменения коэффициента φ_r радиальной составляющей скорости от расхода через полукрытое РК представлены на рис. 2. Там же представлены аналогичные опыты для импеллеров [6] ($V = 0$).

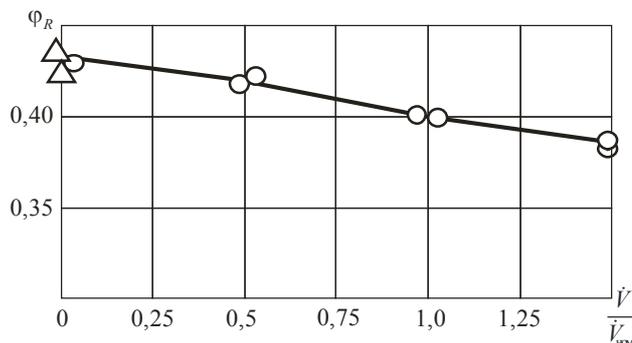


Рис. 2. Зависимость коэффициента радиальной составляющей скорости в полукрытом РК при изменении расхода

На основании проведенных исследований по визуализации потока и измерению его параметров в зазоре между вращающимся РК с открытыми торцами лопаток и гладким корпусом насоса можно представить модель струйно-вихревого обтекания каналов РК (рис. 3). Поток жидкости в межлопаточном канале такого РК подвергается непосредственному силовому воздействию лопаток. Жидкость в зазоре a_1 закручивается за счет сил трения и проскальзывает относительно торцов лопаток РК. Таким образом, на одном и том же радиусе частицы жидкости в канале и осевом зазоре a_1 движутся с различной окружной скоростью, что приводит к относительному их перемещению в радиальном и осевом направлениях.

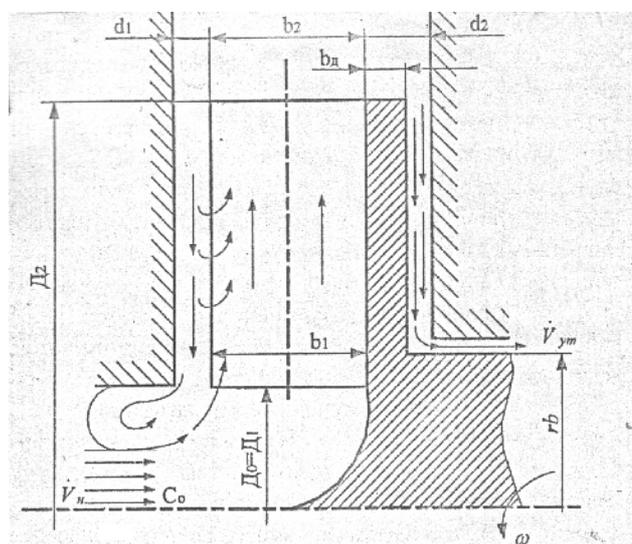


Рис. 3. Схема струйно-вихревого течения в каналах полукрытого РК

Таким образом, как на входном участке РК с открытыми лопатками, так и по его радиусу не вся проточная часть каналов колеса заполнена потоком, движущимся от входа в РК до выхода. Частично его проточная часть заполнена обратным течением. Закрученные в сторону вращения РК обратные точки перетекают в соседний канал на меньший радиус и увлекаются обратно в проточ-

ную часть. При этом образуется течение, жидкость в котором постоянно обновляется за счет расходного течения через насос.

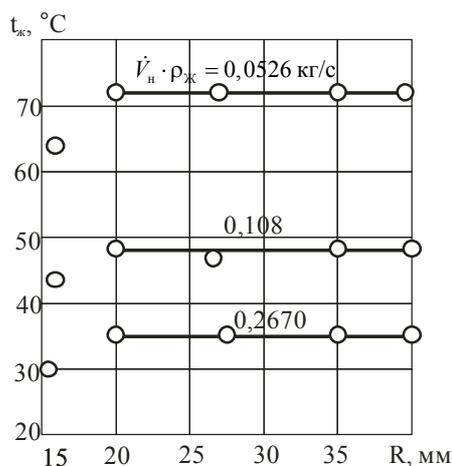


Рис. 4. Распределение температуры жидкости по радиусу с лопаточной стороны рабочего колеса для разных расходов рабочих жидкостей

Основная доля подводимой к рабочему колесу ротора энергии затрачивается на привод лопаток, и, следовательно, теплота трения выделяется главным образом в осевом зазоре, с лопаточной стороны. Без эксперимента трудно установить, будет ли достаточно эффективно охлаждаться расходное течение жидкостью, циркулирующей в осевом зазоре рабочего колеса. Для ответа на этот вопрос были проведены измерения температуры жидкости в осевом зазоре a_1 вдоль радиуса для открытых рабочих колес. Эти измерения показали, что в зазоре температура жидкости постоянна по радиусу и равна температуре на выходе из области лопаток в основной поток жидкости на периферии рабочего колеса ротора и незначительно (на 5–7 %) превышает значение температуры расходного течения до входа в РК (рис. 4). Таким образом, в полуоткрытом РК объемные утечки, влияющие на подогрев рабочей жидкости, не снижают кавитационные качества насосного агрегата, а перетекание жидкости с напорной стороны лопатки на тыльную стабилизирует тем-

пературный режим насоса, исключая кавитационные явления при подаче водорода.

Струйно-вихревое обтекание лопаток полуоткрытого РК при перетокке на меньший радиус обеспечивает полное перемешивание основного расходного течения и вихревого потока в осевом зазоре, что исключает подачу нагретых утечек на вход центробежного колеса насоса.

Приведенные данные измерения градиента температуры по радиусу РК обеспечивают кавитационную устойчивость центробежного насоса с полуоткрытым РК при подаче криогенных компонентов топлив.

При использовании полуоткрытого РК в составе первой ступени водородного насосного агрегата ЖРД обеспечивается простота конструкции, технологичность в изготовлении, а при заданном обеспечении осевого зазора достаточные энергетические характеристики насосного агрегата.

Библиографические ссылки

1. Дмитриенко Л. И. Развитие конструкции турбонасосных агрегатов ЖРД, разработанных в КБХА // Науч.-техн. юбил. Сб. КБ Химавтоматики. Воронеж, 2001. С. 308–314.
2. Позняк М. И., Поляков В. И., Шапиро А. С. Исследование и разработка турбонасосных агрегатов в КБ Химического машиностроения им. А. М. Исаева. Ч. 1 // Космонавтика и ракетостроение, 2002. № 3 (28). С. 70–78.
3. Шапиро А. С. Структура реального течения в центробежных и осевых насосах. М.: МГИУ, 2004.
4. Петров В. И., Чебаевский В. Ф. Кавитация в высокооборотных лопастных насосах. М.: Машиностроение, 1982.
5. Особенности кавитационных качеств насосов турбонасосных агрегатов жидкостных ракетных двигателей при перекачивании криогенных компонентов топлив / И. В. Баньковская, Р. И. Константинов, В. И. Петров [и др.] // Космонавтика и ракетостроение. Вып. 4 (57). 2009. С. 153–158.
6. Краев М. В., Овсянников Б. В., Шапиро А. С. Гидродинамические уплотнения высокооборотных валов. М.: Машиностроение, 1976.

Е. М. Краева, М. В. Краев, А. В. Печарский

INCREASE OF CAVITATING QUALITIES OF THE PUMP UNIT OF THE LIQUID ROCKET ENGINE IN MODE OF SUPPLY OF CRYOGENIC COMPONENTS OF ENGINE FUEL

The article considers characteristic property of pump units of liquid rocket engines in mode of submission of liquid hydrogen. On the basis of visual researches and measurements of parameters of a stream in a flowing part of semiexposed driving wheel of the pump of small rapidity, and their constructive advantages for submission of liquid hydrogen are stated.

Keywords: cavitating, pump package, driving wheel, semiexposed driving wheel, engine fuel supply.

© Краева Е. М., Краев М. В., Печарский А. В., 2010