

на рисунке 1. Расчет проводился по методу характеристик. В таблице представлены графики зависимости максимального напора  $H_{\max}$ , вычисленного по формуле Жуковского, по программе в Excel, которая адаптирована для труб из композитов, и по методу характеристик – от объемного содержания волокон  $V$  при их перпендикулярном расположении.

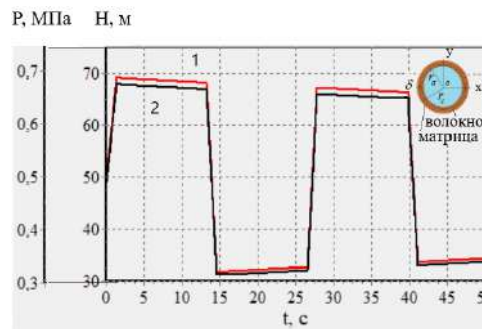


Рисунок 1 – Графики зависимости напора  $H$  (давления  $P$ ) от времени  $t$  вблизи клапана (задвижки) (при  $t_c = 0$  с;  $s = 0$ ;  $V = 1,48$  %) при перпендикулярном расположении волокон: график 1 –  $H$ , график 2 –  $P$  (толщина стенки  $\delta = 0,018$  м)

Таблица 1 – Изменение максимального напора  $H_{\max}$  (в метрах) и скорости  $C$  в зависимости от  $V$

Показатель	$V, \%$										
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Скорость $C$ , м/с	225	680	823	916	990	1053	1109	1160	1208	1251	1291
Формула Жуковского $H_{\max}$ , м	61,6	82,3	92,7	97,5	101,3	104,6	107,5	110,2	112,6	114,9	117,0
Расчет Excel $H_{\max}$ , м	62,8	86,4	93,9	98,7	102,5	105,8	108,7	111,4	113,8	116,1	118,1
Метод характеристик $H_{\max}$ , м	61,4	85,0	92,4	97,3	101,1	104,3	107,3	110,0	112,4	114,6	116,7

Как видно из рисунка 1 и таблицы 1, армирование может увеличить скорость ударной волны и вызвать дополнительные гидравлические скачки давления в трубопроводе в основном за счет увеличения объемного содержания  $V$  армирующих волокон в трубе из композита. Значения  $H_{\max}$ , вычисленные по формуле Жуковского, по программе в Excel и по методу характеристик, достаточно близки (см. таблицу 1), отличие не превышает 3 %.

#### Список литературы

- 1 Жуковский, Н. Е. О гидравлическом ударе в водопроводных трубах / Н. Е. Жуковский. – М. : Гостехтеоретлитиздат, 1949. – 104 с.
- 2 Water hammer Calculation Excel Sheet [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://engineeringxls.blogspot.com/2019/01/water-hammer-calculation-excel-sheet.html>. – Дата доступа : 15.05.2023.
- 3 Mahdy, M. Analysis of water hammer using method of characteristics for different pipes material / Mostafa Mahdy // International Journal of Latest Technology in Engineering, Management & Applied Science (IJLTEMAS). – Vol. VIII, is. I. 2019. – P. 9.
- 4 Можаровский, В. В. Скорость волны при гидроударе и напряженно-деформированное состояние слоистых футерованных труб из ортотропных материалов / В. В. Можаровский, С. В. Киргинцева // Проблемы физики, математики и техники. – 2022. – № 2 (51). – С. 44–51.
- 5 Rahul Kr. Garg. Analysis of Hydraulic Transients in a Reservoir-Valve-Pipeline Arrangement by Using Method of Characteristics (MOC) / Rahul Kr. Garg, Dr. Arun Kumar // Conference Paper. – April 2018. – P. 9.
- 6 Wuyi Wan. Shock wave speed and transient response of PE pipe with steel-mesh reinforcement / Wuyi Wan, Xinwei Mao // Hindawi Publishing Corporation Shock and Vibration. – Vol. 2016. – Article ID 8705031. – P. 10.

УДК 662.769.21

## ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ВОДОРОДА ДЛЯ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ

А. И. КИРИЛЕНКО, И. Л. БУРДИН

Белорусская государственная академия авиации, г. Минск

Во всех отраслях транспорта возрастает потребность в энергии, прежде всего нужен более эффективный энергоноситель. Перспективным направлением для достижения этих целей является во-

дородное топливо. Развитие авиации как вида транспорта шло опережающими темпами в течение длительного времени и, замедлившись во время пандемии, теперь восстанавливается. У водорода есть ряд преимуществ перед другими видами топлива: в случае повреждения топливного бака водород достаточно быстро испарится, рассеется в атмосфере, снижая риск пожара; в случае же возникновения пожара пламя будет иметь меньшую зону теплового воздействия и будет непродолжительным. Методы предотвращения взрыва давно разработаны. Методы получения водорода известны также давно, т. к. водород очень широко применяется в химической промышленности. Тем не менее водород на транспорте (даже в ракетостроении) «не жалуют» по причине его низкой плотности даже в жидком и твердом состояниях (твердый водород при 13 К имеет плотность  $86,67 \text{ кг/м}^3$ , керосин при 293 К –  $780\text{--}850 \text{ кг/м}^3$ ), поскольку для него требуются большие емкости. Однако в сравнении с керосином жидкий водород имеет почти втрое большую удельную плотность энергии на единицу массы – 44 и 119,7 МДж/кг соответственно. Водород можно получить различными средствами, применяя преобразования разных видов энергии: электроэнергию, ядерную, солнечную, энергию ветра, геотермальную, гидроэнергию и термальную энергию океана. Также для добычи водорода можно использовать ископаемые топлива [1]. Водорода на Земле достаточно.

Цель работы – рассмотреть возможности и пути перспективного использования водорода в авиации, основываясь на возможностях современных технологий. Задача – рассмотреть возможности совмещения функций техники в области использования водорода.

В [2, 3] показано, что водород, прежде всего, может использоваться как топливо для двигателей дирижаблей, что связано с четырьмя моментами.

1 Водород обеспечивает подъемную силу и для сгорания не требует высокой очистки.

2 Сжигание газообразного водорода производится из газовых отсеков, что позволяет решить вопрос балластировки дирижабля при полетах на большие расстояния.

3 Водород может использоваться в топливных элементах для получения электроэнергии, в том числе и для питания вентильных электродвигателей.

4 Имеется возможность перехода на жидкий водород. Объемы воздухоплавательных аппаратов позволяют легко решать эту задачу путем теплоизоляции больших баков.

С современной точки зрения дирижабли актуальны при следующих условиях: подъемная сила  $F_n$  пропорциональна объему дирижабля  $V$ , сила сопротивления воздуха (ветра) при движении дирижабля  $F_c$  пропорциональна площади его сечения  $S$ . Отношение этих сил пропорционально характерному размеру аппарата. Это означает, что наиболее эффективны большие дирижабли с грузоподъемностью, сравнимой с грузоподъемностью железнодорожного состава.

Использование водорода на транспорте повлечет за собой значительное увеличение его потребления, а значит, и стоимости. Водород можно получать различными способами. Сегодня в связи с появлением избытка электроэнергии от ветровых и солнечных электростанций самым перспективным является метод электролиза. Такой прогресс обусловлен тем, что за последние 10 лет стоимость выработки электроэнергии на ветроэлектростанциях упала в мире на 70 %, а выработка на солнечных электростанциях – на 89 %. Кроме того, получаемый таким образом водород является наиболее чистым, что актуально для химической промышленности, а также для использования в топливных элементах. Нет сомнений, что получение электроэнергии указанными методами приведет к ее дальнейшему удешевлению за счет совмещения функций техники. Например, ветрогенерация может быть совмещена с получением вакуума за счет центробежного эффекта, что откроет пути к ожижению водорода. Водород может служить и аккумулятором энергии. Таким образом, применение водородного топлива разными способами позволяет добиваться максимальной эффективности. На данный момент в авиации как топливо применяется жидкий водород, где он одновременно служит для охлаждения гиперзвуковых самолетов. Сегодня развивается направление исследований по гиперзвуковым самолетам, для которых альтернативного топлива, кроме водорода, нет. Уже сейчас испытывается экспериментальный самолет на водородном топливе, летающий со скоростью 5 махов.

В авиации реализуются различные пути применения водорода. В основном энергию получают сжиганием водорода, а также путем использования в топливных элементах, что позволяет решить проблему электрического самолета. На данном этапе применяются гибридные топлива. Применение водорода в авиации связано также с экологической эффективностью последнего. Оценки не- $\text{CO}_2$  выбросов показывают, что сжигание водорода может снизить воздействие на кли-

мат в полете на 50–75 %, а двигатель на топливных элементах – на 75–90 %. Для сравнения, для синтетического топлива этот показатель составляет от 30 до 60 %. Для достижения поставленной цели – снижения климатического воздействия выбросов от самолета – необходим прорыв в нескольких технологиях: повысить общую эффективность за счет использования более легких баков (достигнуть показателя 12 кВтч/кг), за счет применения топливных элементов с удельной мощностью 2 кВт/кг (включая охлаждение), использовать жидкий водород (LH<sub>2</sub>), хранимый внутри самолета, разработать турбины, способные сжигать водород с низким содержанием выбросов оксидов азота, а также разработать эффективные технологии заправки топливом, обеспечивающие скорость заправки, сравнимую с таковой при заправке керосином [4, 5].

Отдельно следует рассмотреть проблему выбросов оксидов азота, водяного пара и образование конденсационного следа. В таблице 1 показано влияние каждого из перечисленных выбросов через отношение к такому же влиянию того же количества углекислого газа.

Таблица 1 – Максимальные значения выбросов

Топливо	В процентах				
	Углекислый газ	Оксиды азота	Водяной пар	Конденсационный след	Суммарный эффект
Керосин	100	150	15	150	415
Синтетическое топливо	0	150	15	135	300
Сжигание водорода	0	75	40	105	220
Водородный топливный элемент	0	0	40	60	100

На данный момент разработаны эффективные методы получения синтез-газа – смеси СО и водорода. Поэтому большие усилия концентрируются на разработке эффективных методов выделения водорода из синтез-газа.

Водород как топливо имеет перспективы на транспорте, прежде всего на автомобильном и в авиации, в связи со своей топливной, экономической, экологической эффективностью, многофункциональностью в применении, относительной простотой получения. Особенно эффективным может оказаться водород при использовании в дирижаблях. В ближайшем будущем водород может оказаться востребованным как топливо для двигателей больших океанских судов, дающих большие выбросы СО<sub>2</sub>. Отработаны правила безопасного обращения с водородом. Дело за созданием соответствующей инфраструктуры. Уже существует множество экспериментальных автомобилей и самолетов, использующих водород в различных вариантах. Помимо этого, его можно считать возобновляемым источником энергии. Совмещение функций техники при использовании водорода представляется наиболее экономически выгодным путем его использования.

#### Список литературы

- 1 Brewer, G. D. Hydrogen aircraft technology / G. D. Brewer. – Boca Raton : CRC Press Int, 1991. – 431 p.
- 2 Кирилин, А. Н. Дирижабли / А. Н. Кирилин. – М. : МАИ-Принт, 2013. – 415 с.
- 3 Бойко, Ю. С. Голубая мечта столетий / Ю. С. Бойко, В. А. Турьян. – М. : Машиностроение, 1991. – 128 с.
- 4 Hydrogen-powered aviation A fact-based study of hydrogen technology, economics, and climate impact by 2050. – Luxembourg : Publications Office of the European Union, 2020. – 96 p.
- 5 Handbook of alternative fuel technologies / ed. by: S. Lee, J. G. Speight, S. J. Loyalka. – 2nd ed. – Boca Raton : CRC Press, 2015. – 650 p.

УДК 551.461

## АТМОСФЕРА: МОДЕЛИ И СТАНДАРТЫ ДЛЯ АВИАЦИИ

*А. И. КИРИЛЕНКО, А. И. ЛИСТОПАД*

*Белорусская государственная академия авиации, г. Минск*

Атмосфера – это ресурс. На этот ресурс много потребителей. Свойства и характеристики этого ресурса определяют правила его эксплуатации и требования к технике, посредством которой она