

Моделирование тепломассообменных процессов при испытаниях технологического оборудования автономных комплексов

© И.С. Плотников, В.В. Чугунков

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

Длительные тепловые испытания технологического оборудования, предназначенного для обеспечения функционирования автономных технических комплексов при повышенных значениях температур, проводят в целях подтверждения его эффективной работоспособности и надежности в условиях, приближенных к эксплуатационным. Рассмотрена технология проведения тепловых испытаний оборудования, основанная на размещении его элементов в открытом резервуаре с нагретой водой. При организации длительных тепловых испытаний оборудования требуется снижение затрат энергии и потерь воды от испарения с открытой поверхности резервуара, что в свою очередь требует определения и анализа параметров тепломассообмена между наружным воздухом и наполненным водой открытым резервуаром с расположенным в нем технологическим оборудованием. Рассмотрены математические модели и результаты моделирования температурного режима и массообмена открытого резервуара с водой при проведении тепловых испытаний технологического оборудования. Для уменьшения затрат энергии и испарения воды со свободной поверхности резервуара проведены оценки размещения на поверхности воды полых сферических изоляторов и показана возможность снижения потоков массы воды от испарения более чем на порядок при уменьшении энергопотребления испытательного оборудования более чем в 2 раза.

Ключевые слова: резервуар, нагрев воды, испарение воды, моделирование тепломассопереноса.

Введение. На автономных объектах технических комплексов различного назначения предъявляются жесткие требования к работоспособности технологического оборудования при повышенных значениях температур. В связи с этим проводят предварительные тепловые испытания элементов оборудования в условиях, приближенных к условиям эксплуатации.

Одним из вариантов проведения тепловых испытаний технологического оборудования, представленного на рис. 1, является размещение его элементов в открытом резервуаре с нагретой водой, температура которой поддерживается в заданном интервале значений в течение длительного времени с использованием блока нагревателей, оборудованного системой автоматического поддержания температуры.

Тепловые испытания технологического оборудования — это энергоемкие и длительные процессы: требуется определять параметры нагрева открытого резервуара с водой и расположенным в нем технологическим оборудованием, а также массообмена воды с наружным воздухом на основе моделирования тепломассообменных процессов.



Рис. 1. Размещение технологического оборудования в открытом резервуаре с нагретой водой при проведении тепловых испытаний

Обзор источников информации. Моделированию процессов изменения температуры жидких сред в резервуарах наземных комплексов посвящен ряд публикаций [1, 2], в которых рассмотрены математические модели теплообмена закрытых резервуаров с наружным воздухом при нагреве и охлаждении ракетного топлива. Температурный режим резервуаров с открытой поверхностью в этих работах не рассматривается.

Закономерности уноса воды с поверхности открытых резервуаров применительно к эксплуатации открытых бассейнов рассмотрены в работах [3, 4], в которых рекомендуемые зависимости основаны на обобщении экспериментальных данных при температурном режиме воды не выше 30 °С, в то время как для тепловых испытаний технологического оборудования температура воды должна быть на уровне 60 °С. Некоторые полезные результаты применительно к рассматриваемым условиям протекания тепломассообменных процессов приведены в работах [5–10].

Постановка задачи. Для проектирования блока нагревателей испытательного резервуара необходимо определить требуемую мощность нагревателей для достижения заданной температуры нагрева за требуемое время, а также поток массы воды с открытой поверхности резервуара и возможные методы уменьшения ее испарения при проведении испытаний.

Для получения отмеченных характеристик необходимо построить математическую модель тепломассообменных процессов при тепловых испытаниях технологического оборудования с использованием закономерностей и уравнений тепломассообмена, а также геометрии

ческих и теплофизических характеристик испытательного резервуара и технологического оборудования.

Математические модели процессов тепломассообмена. Процесс нагрева жидкости в испытательном резервуаре в предположении о квазистационарности его теплообмена с окружающей средой может быть представлен следующим уравнением:

$$Q_H + Q_{п.н} - \left[k_6 F_6 + k_d F_d + (\alpha_{к.з} + \alpha_{л.з} + \alpha_{ф.з}) F_3 \right] (T_B - T_H) = \\ = m_B c_B \left(1 + \frac{m_e c_e + m_o c_o}{m_B c_B} \right) \frac{dT_B}{dt},$$

где $Q_H, Q_{п.н}$ — тепловые потоки от нагревателя и погружного насоса, обеспечивающего перемешивание воды в резервуаре; k_6, F_6 — коэффициент теплопередачи и площадь боковой поверхности резервуара; k_d, F_d — коэффициент теплопередачи и площадь днища резервуара; $\alpha_{к.з}, \alpha_{л.з}, \alpha_{ф.з}$ — коэффициенты теплоотдачи конвекцией, излучением и за счет фазового перехода на поверхности зеркала жидкости; F_3 — площадь поверхности зеркала жидкости; T_B — температура воды в резервуаре; T_H — температура наружного воздуха; m_B, c_B — масса и удельная теплоемкость воды; m_e, c_e — масса и удельная теплоемкость резервуара (емкости); m_o, c_o — масса и удельная теплоемкость оборудования; t — время.

Для расчета коэффициента теплопередачи боковых поверхностей резервуара использованы следующие соотношения для конвективной составляющей теплоотдачи [5]:

$$\text{при } 10^3 < Ra_{hж} < 10^9 \\ \overline{Nu}_{hж} = 0,76 Ra_{hж}^{0,25} (Pr_{ж} / Pr_{ст})^{0,25};$$

$$\text{при } Ra_{hж} > 10^9 \\ \overline{Nu}_{hж} = 0,15 Ra_{hж}^{0,33} (Pr_{ж} / Pr_{ст})^{0,25}.$$

Для расчета коэффициента теплопередачи днища резервуара, определяющим размером l которого является отношение площади днища к его периметру, а определяющей температурой — температура граничного слоя, использованы следующие соотношения для конвективной составляющей теплоотдачи [5]:

$$\text{при } Ra_l < 10^5 \\ \overline{Nu}_l = 1,1 Ra_l^{0,2}; \tag{1}$$

при $Ra_l > 10^5$

$$\overline{Nu}_l = 0,203Ra_l^{0,333}. \quad (2)$$

Аналогичные соотношения применены для вычисления конвективных коэффициентов теплоотдачи на поверхности зеркала жидкости.

Коэффициенты теплоотдачи за счет фазового перехода на поверхности зеркала жидкости определены с помощью соотношения [6]

$$\alpha_{ф.з} = \frac{r_{\phi} \alpha_{к.з} (d_{в} - d_{н})}{c_{н} (T_{в} - T_{н})},$$

где r_{ϕ} — удельная теплота фазового перехода воды на поверхности зеркала жидкости; $d_{в}$ — влагосодержание воздуха у поверхности зеркала жидкости; $d_{н}$ — влагосодержание наружного воздуха; $c_{н}$ — удельная теплоемкость наружного воздуха.

Результаты математического моделирования. Моделирование тепломассообменных процессов проведено для резервуара в форме параллелепипеда с геометрическими размерами ребер 1,4:1,3:1,0 по отношению к высоте резервуара, выполненного из листовой коррозионно-стойкой стали, с массой конструкции 0,2 по отношению к массе воды, заполняющей резервуар.

На рис. 2 представлены данные о нагреве резервуара с водой при различной мощности нагрева и поддержании температуры 20 °С и относительной влажности воздуха 80 % в помещении, в котором проводятся испытания.

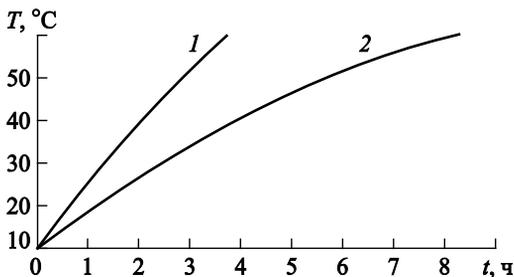


Рис. 2. Температура воды в резервуаре при относительной мощности нагрева 17 (1) и 8,5 (2) Вт/кг в зависимости от времени нагрева

Приведенные данные свидетельствуют о том, что тепловая энергия нагревателя расходуется не только на нагрев резервуара с водой, но и на испарение воды, а также на теплообмен резервуара с помещением. При уменьшении мощности нагревателя в 2 раза возрастает не только время нагрева (в 2,25 раза), но и общие затраты энергии на нагрев резервуара до требуемой температуры (в 1,13 раза).

Потери теплоты с открытой поверхности резервуара при проведении испытаний составляют более 60 % общих потерь теплоты через все поверхности резервуара, так как плотность теплового потока с открытой поверхности многократно превышает плотность теплового потока через боковые поверхности и днище резервуара (рис. 3).

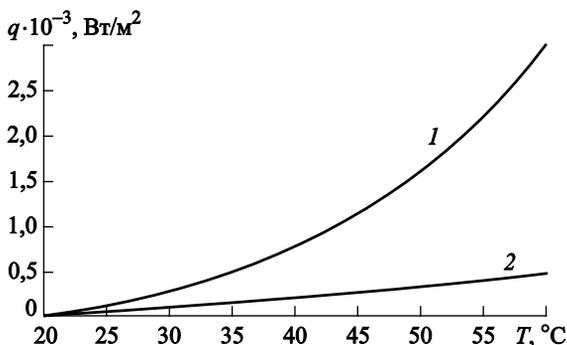


Рис. 3. Изменение плотности теплового потока с открытой поверхности (1) и средней плотности теплового потока через боковые поверхности и днище резервуара (2) в процессе нагрева

С повышением температуры увеличивается плотность потока массы воды, испаряющейся с открытой поверхности (рис. 4), что приводит к необходимости существенного пополнения резервуара водой и ее нагрева в ходе испытаний.

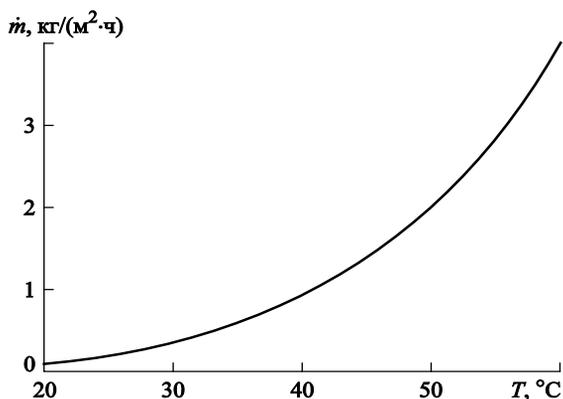


Рис. 4. Изменение плотности потока массы воды, испаряющейся с открытой поверхности, в процессе нагрева

Для уменьшения потерь теплоты и массы воды при проведении испытаний рассмотрен вариант размещения на свободной водной поверхности резервуара полых сферических изоляторов, закрывающих свободную поверхность воды, в два ряда (рис. 5).

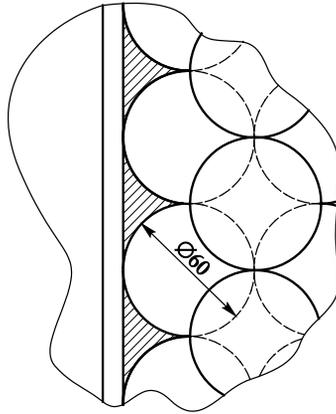


Рис. 5. Схема размещения сферических изоляторов на свободной водной поверхности резервуара при проведении тепловых испытаний оборудования (штриховыми линиями показаны свободные поверхности испарения)

При моделировании тепломассообмена испытательного резервуара в условиях размещения на поверхности воды сферических изоляторов размер l , используемый в формулах (1) и (2) для вычисления коэффициента теплоотдачи на поверхности зеркала воды, определяли по площади и периметру зоны свободной поверхности, образованной в области примыкания изоляторов к стенке резервуара (см. рис. 5). Результаты моделирования, полученные для сферических изоляторов диаметром 6 см (рис. 6 и 7), свидетельствуют о возможности существенного уменьшения (более чем на порядок) потерь массы воды от испарения, а также о возможности снижения более чем в 2 раза затрат энергии на проведение испытаний.

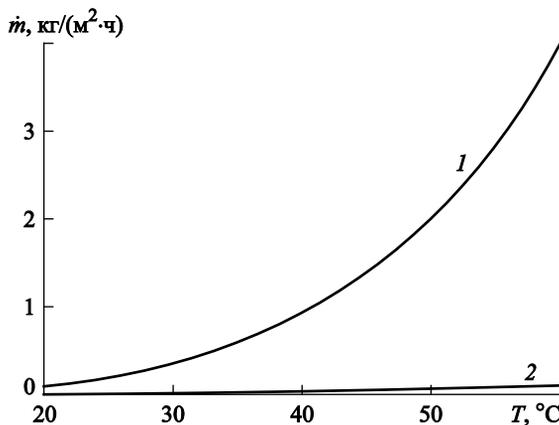


Рис. 6. Изменение в процессе нагрева плотности потока массы воды, испаряющейся с открытой поверхности резервуара (1) и при размещении на водной поверхности полых сферических изоляторов (2)

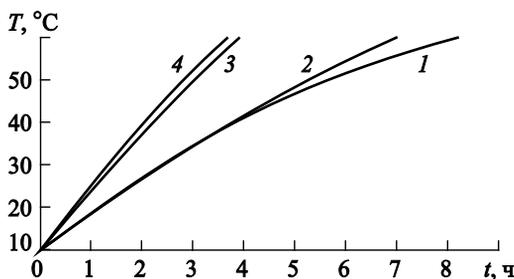


Рис. 7. Изменение температуры воды в процессе нагрева при открытой поверхности резервуара с относительной мощностью нагрева 8,5 (1) и 17 (3) Вт/кг в сравнении с нагревом при поверхности воды, закрытой полыми сферическими изоляторами, с относительной мощностью нагрева 8,5 (2) и 17 (4) Вт/кг

Заключение. Выполненный на основе разработанной математической модели анализ теплообменных процессов и температурных режимов резервуаров с нагретой водой, имеющих открытую поверхность зеркала жидкости, выявил существенные потери теплоты и массы воды от испарения при проведении испытаний технологического оборудования. Потери теплоты с открытой поверхности резервуара составляют более 60 % общих потерь теплоты через все поверхности. Плотность потока массы воды, испаряющейся с открытой поверхности резервуара, для условий проведения испытаний имеет значения около $4 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$, что приводит к необходимости существенного пополнения резервуара водой и ее нагрева в ходе длительных испытаний технологического оборудования.

Рассмотренный способ уменьшения потерь теплоты и массы воды при проведении испытаний, основанный на размещении на свободной водной поверхности резервуара полых сферических изоляторов, которые закрывают свободную поверхность воды, свидетельствует о возможности уменьшения более чем на порядок потерь массы воды от испарения, а также о возможности снижения более чем в 2 раза затрат энергии на проведение испытаний и кондиционирование помещения, в котором эти испытания проводятся.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Золин А.В., Чугунков В.В. Моделирование процессов температурной подготовки ракетного горючего в системе заправки стартового комплекса. *Аэрокосмический научный журнал*, 2015, № 6. DOI: 10.7463/aersp.0615.0826690. URL: <http://aerosjournal.ru/doc/826690.html> (дата обращения 05.08.2016).
- [2] Денисова К.И., Чугунков В.В. Моделирование процессов охлаждения и нагрева ракетного топлива во внутреннем пространстве емкостей наземных ком-

- плексов. *Аэрокосмический научный журнал*, 2016, № 1. DOI: 10.7463/aersp.0116.0834621. URL: <http://aerospjournal.ru/doc/834621.html> (дата обращения 05.08.2016).
- [3] Алейников А.Е., Федоров А.Б. *Испарение влаги с водных поверхностей в условиях крытых аквапарков*. URL: <http://www.sisvitu.ru/data/text/manuscript/manuscript02.doc>
- [4] *Расчет вентиляции бассейна*. URL: <http://svoservice.ru/poleznye-stati/raschjot-ventilyatsii-bassejna> (дата обращения 05.08.2016).
- [5] Лобасова М.С., Финников К.А., Миловидова Т.А., Дектерев А.А., Серебренников Д.С., Минаков А.В., Кузоватов И.А., Васильев В.В. *Тепломассообмен*. Красноярск, ИПК СФУ, 2009. URL: <http://staff.ttu.ee/~asiirde/Loengud/Leviprotsessid/venekeel> (дата обращения 09.09.2016).
- [6] Цветков Ф.Ф., Киримов Р.В., Величко В.И. *Задачник по тепломассообмену*. 2-е изд. Москва, Изд-во МЭИ, 2008, 196 с.
- [7] Цветков Ф.Ф., Григорьев Б.А. *Тепломассообмен*. 2-е изд. Москва, Изд-во МЭИ, 2005, 550 с.
- [8] Кузнецов Г.В., Максимов В.И., Шеремет М.А. Естественная конвекция в замкнутом параллелепипеде при наличии локального источника энергии. *Прикладная механика и техническая физика*, 2013, т. 54, № 4 (320), с. 86–95. URL: <http://elibrary.ru/item.asp?id=20181192> (дата обращения 20.08.2016).
- [9] Bower S., Saylor J. A study of the Sherwood–Rayleigh relation for water undergoing natural convection-driven evaporation. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2009, vol. 52, pp. 3055–3063.
- [10] Bower S., Saylor J. Sherwood–Rayleigh Parameterization for Evaporation in the Presence of Surfactant Monolayers. *AIChE Journal*, 2013, vol. 59, no. 1, pp. 303–315.

Статья поступила в редакцию 01.09.2016

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Плотников И.С., Чугунков В.В. Моделирование тепломассообменных процессов при испытаниях технологического оборудования автономных комплексов. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2016, вып. 10. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2016-10-1540>

Плотников Илья Сергеевич родился в 1994 г. Студент кафедры «Стартовые ракетные комплексы» МГТУ им. Н.Э. Баумана. e-mail: sm8@sm8.bmstu.ru

Чугунков Владимир Васильевич родился в 1950 г., окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1973 г. Д-р техн. наук, профессор кафедры «Стартовые ракетные комплексы» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 130 научных работ в области тепломассообмена в агрегатах и системах стартовых комплексов. e-mail: sm8@sm8.bmstu.ru

Simulation of heat and mass transfer processes in technological equipment tests for autonomous complexes

© I.S. Plotnikov, V.V. Chugunkov

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

The object of the study is the long-term technological equipment thermal test designed to ensure the autonomous engineering systems which are functioning at elevated temperature values. The test is carried out in order to confirm the equipment effective performance and reliability in conditions similar to the operating ones. The article considers the thermal testing technology, based on equipment elements placement in an open tank with heated water. When organizing long thermal tests, it is required to reduce energy cost and evaporated water loss from the exposed reservoir surface, which in turn requires that we analyze and determine the outside air heat and mass transfer parameters, with the equipment located in the open water tank. The article describes temperature regime and mass transfer mathematical models, gives simulation results during thermal testing in the open tank filled with water. To reduce the required energy and evaporation from the open water surface, we assessed the results of placing hollow spherical insulators on the water surface and showed an opportunity to reduce evaporation masses of more than an order of magnitude by reducing test equipment energy consumption by more than 2 times.

Keywords: tank, heating and evaporation of water, simulation of heat and mass transfer.

REFERENCES

- [1] Zolin A.V., Chugunkov V.V. *Aehrokosmichesky nauchny zhurnal – Aerospace Scientific Journal*, 2015, no. 6.
Available at: <http://aerospjournal.ru/doc/826690.html> (accessed November, 2015). DOI: 10.7463/aersp.0615.0826690
- [2] Denisova K.I., Chugunkov V.V. *Aehrokosmichesky nauchny zhurnal — Aerospace Scientific Journal*, 2016, no. 1.
Available at: <http://aerospjournal.ru/doc/834621.html> (accessed January, 2016). DOI: 10.7463/aersp.0116.0834621
- [3] Aleynikov A.E., Fedorov A.B. *Isparenie vlagi s vodnykh poverkhnostey v usloviyakh krytykh akvaparkov — Evaporation of moisture from water surfaces in indoorwater pools*.
Available at: <http://www.sisvitu.ru/data/text/manuscript/manuscript02.doc>
- [4] *Raschet ventilyatsii basseyna — Pool ventilation calculation*. Available at: <http://svoservice.ru/poleznye-stati/raschjot-ventilyatsii-bassejna>
- [5] Lobasova M.S., Finnikov K.A., Milovidova T.A., Dektarev A.A., Serebrennikov D.S., Minakov A.V., Kuzovatov I.A., Vasilyev V.V. *Teplomassoobmen [Heat and mass transfer]*. Krasnoyarsk, IPK SFU Publ., 2009. Available at: <http://staff.ttu.ec/~asiirde/Loengud/Leviprotsessid/venekeel> (accessed September 9, 2016).
- [6] Tsvetkov F.F., Kirimov R.V., Velichko V.I. *Zadachnik po Teplomassoobmenu [Book of problems in heat and mass transfer]*. 2nd ed., Moscow, MPEI Publ., 2008, 196 p.

- [7] Tsvetkov F.F., Grigorev B.A. *Teplomassoobmen* [Heat and mass transfer]. 2nd ed., Moscow, MPEI Publ., 2008, 550 p.
- [8] Kuznetsov G.V., Maksimov V.I., Sheremet M.A. *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika — Applied Mechanics and Technical Physics*, 2013, vol. 54, no. 4, pp. 86–95. Available at: <http://elibrary.ru/item.asp?id=20181192> (accessed August 20, 2016).
- [9] Bower S., Saylor J. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2009, vol. 52, pp. 3055–3063.
- [10] Bower S., Saylor J. *AIChE Journal*, 2013, vol. 59, no. 1, pp. 303–315.

Plotnikov I.S., student, Department of Launch Rocket Complexes, Bauman Moscow State Technical University. e-mail: sm8@sm8.bmstu.ru

Chugunkov V.V., Dr. Sci. (Eng.), Professor, Department of Launch Rocket Complexes, Bauman Moscow State Technical University. Author of over 130 research publications in the field of heat-mass-transfer in aggregates and systems of launch complexes. e-mail: sm8@sm8.bmstu.ru