

Тепловые процессы в технике. 2026. Т. 18. № 5. С. 207–213
Thermal processes in engineering, 2026, vol. 18, no. 5, pp. 207–213

Научная статья

УДК 629.7.036.34, 532.526, 536.244

URL: <https://tptmai.ru/publications.php?ID=188857>

EDN: <https://www.elibrary.ru/CPIIBU>

Модель компенсации влияния переходных процессов в топливных магистралях современных авиационных двигателей

А.Р. Асланов¹, В.М. Краев², А.С. Мякочин³✉, С.Д. Селиверстов⁴

¹АО «Национальный центр вертолетостроения имени М.Л. Миля и Н.И. Камова», Москва, Российская Федерация

^{2,3,4}Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва, Российская Федерация

³amyakochin@gmail.com ✉

Аннотация. Проведен анализ проблем, связанных с применением перспективных топлив для газотурбинных двигателей, и отмечена важная особенность, которая может привести к нерасчетному режиму работы двигателя. Среди альтернативных видов топлива для авиационных двигателей рассматривались криогенные авиационные топлива, к которым относится сжиженный природный газ, состоящий в основном из метана. Криогенные топлива для авиации имеет ряд особенностей по сравнению с традиционным топливом на основе углеводородов. Авторами выявлен эффект возможного холодного вскипания криогенного топлива в топливных магистралях при резком росте гидравлического сопротивления и подтверждается неприемлемость применения квазистационарного подхода для расчета нестационарных процессов в топливных магистралях современных авиационных двигателей. Предложена модель компенсации влияния переходных процессов для повышения кавитационной устойчивости насосного агрегата перспективного авиационного двигателя.

Ключевые слова: авиационные газотурбинные двигатели, взлетный режим авиационных ГТД, устойчивая работа ГТД, криогенное топливо, метан, нестационарные процессы, гидродинамика и теплообмен в каналах

Для цитирования. Асланов А.Р., Краев В.М., Мякочин А.С., Селиверстов С.Д. Модель компенсации влияния переходных процессов в топливных магистралях современных авиационных двигателей // Тепловые процессы в технике. 2026. Т. 18. № 5. С. 207–213. URL: <https://tptmai.ru/publications.php?ID=188857>

Original article

A compensation model for the effect of transient processes in the fuel lines of modern aircraft engines

A.R. Aslanov¹, V.M. Kraev², A.S. Myakochin³✉, S.D. Seliverstov⁴

¹JSC “M.L. Mil and N.I. Kamov National Helicopter Center”, Moscow, Russian Federation

^{2,3,4}Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russian Federation

³amyakochin@gmail.com✉

Abstract. Civil aviation transport, like no other, is overly sensitive to rising prices for traditional hydrocarbon fuels. This dependence is related to the significant fuel component in the cost of air transportation. The aircraft engines designers have been trying to switch to alternative fuels for more than 25 years. Cryogenic aviation fuels were considered among alternative fuels for aircraft engines. These include: liquefied natural gas consisting mainly of methane, liquid hydrogen and cryogenic propane. Cryogenic fuels for aviation have a number of features compared to traditional hydrocarbon-based fuels. From the point of view of ecology, such fuel is a direct competitor to aviation kerosene. In 1998, an aircraft with a liquid hydrogen engine Tu-155 was tested in the Soviet Union, and in 1989, equipment testing and research into cryoplane capabilities using liquefied natural gas Tu-156 began. Previous results show a significant increase in the coefficients of heat transfer and hydraulic resistance at the time the engine was switched from idle into take-off mode. The reason for this change is the restructuring of the turbulent flow structure in hydrodynamically unsteady conditions. The heat transfer coefficient can exceed the values calculated from stationary dependences by more than 2 times, and the coefficient of hydraulic resistance by more than 3 times. This difference leads to significant disruptions in the operation of the entire cryogenic fuel system, and may lead to operational failures. In real engines, switching from taxi mode to take-off mode increases fuel consumption up to 10 times in a few seconds, which is a significantly unsteady process not only for the engine itself, but also for the entire fuel system. The authors have identified the effect of possible cold boiling of cryogenic fuel in fuel lines with a sharp increase in hydraulic resistance and confirmed the unacceptability of using a quasi-steady approach to calculate non-stationary processes in the fuel lines of modern aircraft engines.

The proposed model for compensating the effects of transients is suitable for practical calculations in the fuel systems of modern gas-turbine engines operating on cryogenic fuel. Further research in the field of unsteady flows of cryogenic liquids to create more accurate engineering models.

Keywords: aviation gas turbine engines, cryogenic fuel, unsteady processes, hydrodynamics and heat transfer in channels, cavitation stability

For citation. Aslanov A.R., Kraev V.M., Myakochin A.S., Seliverstov S.D. A compensation model for the effect of transient processes in the fuel lines of modern aircraft engines. *Thermal processes in engineering*. 2026, vol. 18, no. 5, pp. 207–213. (In Russ.). URL: <https://tptmai.ru/publications.php?ID=188857>

Введение

Авиационный гражданский транспорт, как никакой, наверное, чрезмерно чувствителен к росту цен на традиционные углеводородные топлива. Эта зависимость связана с весомой топливной составляющей в стоимости авиаперевозок. Создатели авиационных двигателей уже более

25-ти лет назад осуществляли попытки перейти на альтернативные топлива.

Такое топливо является с точки зрения экологии прямым конкурентом авиационному керосину. В 1998 году в Советском Союзе был испытан летательный аппарат с двигателем на жидком водороде (Ту-155), а уже в 1989 году начались испытания оборудования и исследования воз-

возможностей криоплана при использовании сжижений природный газ (далее – СПГ) (Ту-156).

Нестационарные процессы наблюдаются во многих технических системах. В сложных инженерных системах, какими являются современные авиационные двигатели, нестационарные процессы могут привести к аварийным ситуациям, если они выходят за пределы расчетных диапазонов. Например, включение или выключение насоса в системе подачи жидкости или изменение расхода жидкости может значительно изменить поле давления, что в свою очередь приводит к изменению коэффициентов теплоотдачи и гидравлического сопротивления в несколько раз. Нестационарные условия могут оказывать существенное влияние на процессы в системах подачи жидкого криогенного топлива, которое зачастую находится в состоянии, близком к линии насыщения. Особенно сильное влияние на гидравлическое сопротивление оказывает ускорение потока, что может привести к его увеличению до недопустимых значений из-за изменения турбулентной структуры потока. Это может уменьшить кавитационный запас турбонасосного агрегата и необходимый напор подкачивающего насоса. Проектирование криогенной топливной системы (КТС) необходимо проводить с учетом влияния нестационарных процессов и использованием моделей, компенсирующих такое влияние, в каналах.

Ранее были получены результаты, показывающие существенный рост коэффициентов теплоотдачи и гидравлического сопротивления в момент вывода двигателя на взлетный режим. Причиной такого изменения является перестройка структуры турбулентного течения в гидродинамически нестационарных условиях. Коэффициент теплоотдачи может превышать значения, рассчитанные по стационарным зависимостям более 2-х раз, а коэффициент гидравлического сопротивления – более 3-х раз. Указанное отличие приводит к существенным нарушениям работы всей криогенной топливной системы, и может привести к отказам в работе. В реальных двигателях переход на взлетный режим увеличивает расход топлива до 10 раз за несколько секунд, что представляет собой значительно нестационарный процесс не только для самого двигателя, но и для всей топливной системы.

Материалы и методы

Нестационарные процессы вызывают значительные изменения в турбулентных течениях, теплообмене и гидродинамике. Они играют все большее значение в различных областях, от авиации до энергетики. Поэтому изучение нестационарных явлений является очень важной областью научных исследований. Изменение турбулентной структуры течения в нестационарных условиях действительно может оказывать значительное влияние на теплообмен и гидродинамику течения. Турбулентные потоки имеют сложную структуру, которая сильно подвергается влиянию нестационарных условий, что, в свою очередь, воздействует на процессы теплообмена и гидродинамики.

Изучением процессов гидродинамики и теплообмена в нестационарных условиях в МАИ занимаются с 1980-х годов. Основоположником этой научной школы является проф. Дрейцер Г.А. [1, 2]. В МЭИ теоретическую школу этого направления возглавлял проф. Попов Д.Н. [3]. Результаты численных исследований в МЭИ проф. Валуевой Е.П. позволяют оценить масштаб влияния нестационарных условий на структуру турбулентных течений [4, 5].

Проведение экспериментов в нестационарных условиях может быть чрезвычайно сложным и трудоемким процессом, особенно при исследовании процессов в различных средах. Это приводит к недостатку экспериментальных данных, особенно при процессах с применением других рабочих тел, кроме воздуха и воды. Также наблюдаются отличия в результатах экспериментов разных авторов. Расхождения в полученных результатах могут быть вызваны различными факторами, такими как различия в методологии эксперимента, используемом оборудовании и даже в использовании разных рабочих сред. Для формирования более полной картины понимания нестационарных процессов важно проводить дальнейшие исследования и сравнивать результаты различных экспериментов, а также обобщать и анализировать эти данные в более широком контексте.

Нестационарный коэффициент сопротивления трения сравнивают с его квазистационарным аналогом [6]. Квазистационарный подход нередко используется при расчетах нестационарных процессов, когда вместо реального параметра при-

меняется его т. н. квазистационарный аналог, рассчитанный по мгновенным значениям скоростей, температур и тепловым потокам. Несмотря на широкое распространение, такой подход не всегда правомерен, т. к. не учитывает влияния именно нестационарного воздействия. В рассматриваемом примере не учитывается перестройка профилей скорости, пульсаций и их корреляций. Ранее проведенные исследования [2] показали существенное, до нескольких раз, отличие нестационарных значений от квазистационарных.

Для моделирования течения жидких криогенных топлив в каналах топливных магистралей была создана расчетная модель гидравлического сопротивления в нестационарных условиях, основанная на модели турбулентности SST $k-\omega$ [6]. Корректность выбранного подхода подтверждается результатами верификации с экспериментальными данными.

Экспериментальные данные, полученные ранее, показали существенное влияние ускорения и замедления течения на теплоотдачу и гидравлическое сопротивление при течении газов [7] и жидкостей [8]. Эти данные подтвердили корректность выбранной методики и полученной модели [6]. Модель будет полезна для анализа структуры турбулентных газовых потоков в различных условиях: как стационарных, так и нестационарных, изотермических и неадиабатических.

Предложенная модель [6] для расчетов процессов теплообмена и гидродинамики жидкого метана была верифицирована с помощью экспериментальных данных, полученных на воде. Проведенные ранее исследования по гидравлическому сопротивлению и теплоотдаче в нестационарных условиях показали существенное различие параметров для воды и воздуха. Например, при течении воздуха, и теплоотдача, и сопротивление растут при ускорении течения [7].

Это акцентирует внимание на сложности моделирования переходных процессов и необходимости учета временной динамики турбулентности при анализе экспериментальных данных. Для более полного понимания и описания этих процессов важно учитывать не только начальные условия, но и изменения параметров потока с течением времени. Подробное изучение этих изменений как в качественном, так и в количественном аспектах является необходимым для оптимизации и надежной работы различных

инженерных систем, включая теплообменники, газотурбинные установки, трубопроводы и другие устройства, где ключевыми факторами являются теплоотдача и сопротивление трению.

Однако, полученные ранее результаты по гидравлическому сопротивлению в нестационарных условиях не представляют собой удобную для инженерного применения методики. Поэтому получение модели для расчета надкавитационного запаса весьма актуально, и будет представлено в настоящей работе.

Результаты

Ранее [6] были представлены экспериментальные данные коэффициента сопротивления трения в нестационарных условиях при течении воды в нестационарном процессе в трубе. Отмечен существенный рост сопротивления трения в начальный момент нестационарного процесса.

Влияния нестационарных условий учитывается относительным коэффициентом сопротивления трения:

$$\Lambda = \frac{\xi_r}{\xi_{kc}}, \quad (1)$$

где ξ_r – коэффициент сопротивления трения в нестационарных условиях, ξ_{kc} – коэффициент сопротивления трения в стационарных условиях.

Полученные результаты численного моделирования влияния гидродинамической нестационарности на гидравлическое сопротивление при течении жидкого метана при ускорении течения в трубе $d = 59$ мм [6] представлены на рис. 1.

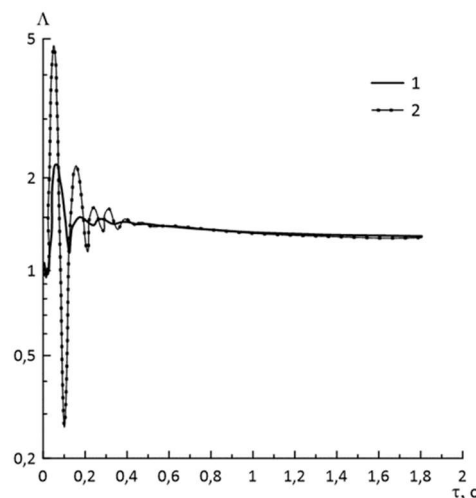


Рис. 1. Относительный коэффициент сопротивления трения при течении жидкого метана в нестационарном процессе в трубе $d = 59$ мм: 1 – $Re = 4,6 \times 10^5 \dots 5,33 \times 10^6$, 2 – $2,3 \times 10^5 \dots 2,77 \times 10^6$

Полученные данные численного моделирования позволяют прийти к пониманию характера влияния ускорения течения на относительный коэффициент трения. Стоит отметить, что выявленное влияние качественно совпадает с экспериментальными данными по воде [9, 10]. Из этого можно сделать логический вывод об аналогичных результатах гидродинамически нестационарных воздействий на теплообмен и гидродинамику при течении жидкого метана.

Представленная выше модель нестационарного воздействия является основой для получения расчетной зависимости относительного коэффициента сопротивления трения [6].

$$\Lambda = \frac{a + bx + c \ln z + d (\ln z)^2}{1 + ex + f \ln z + g (\ln z)^2}, \quad (2)$$

где $a = 2,3147926$, $b = -0,00022239719$, $c = -0,47994197$, $d = 0,025274826$, $e = -0,00013180057$, $f = -0,22689097$, $g = 0,01312809$, x – диаметр топливной магистрали в мм, z – число Рейнольдса.

Как мы уже говорили ранее, рост гидравлического сопротивления в магистралях подачи топлива к насосу оказывает негативное влияние на его устойчивую работу. При падении давления на входе в насос возможно возникновение кавитационного эффекта вплоть до остановки насоса.

Однако, для практических инженерных расчетов такой подход (выражение (2)) не совсем удобен, и требуется получение значения т. н. надкавитационного запаса для насоса.

Зная распределение функции Λ по диаметру канала и числу Рейнольдса, можно определить надкавитационный напор системы с насосом $NPSHa$ (Net Positive Suction Head). Для случая прямых гладких труб получено выражение, которое может быть использовано для расчета значений $NPSHa$ на входе в ТНА.

Выражение для потерь давления на трение в канале в момент максимального ускорения:

$$\Delta P_{mp} = \Lambda \frac{l}{d_c} \frac{\rho \bar{\omega}^2}{2}, \quad (3)$$

где Λ – относительный коэффициент сопротивления трения, l – длина канала, d_c – диаметр

канала, ρ – плотность топлива, $\bar{\omega}$ – скорость топлива в канале.

Выражение для суммарных потерь давления на трение в канале:

$$\Delta P = \sum \Delta P_{mp} + \sum \Delta P_m + \sum \Delta P_{уск} + \sum \Delta P_c, \quad (4)$$

где ΔP_{mp} – потери давления на трение в канале в момент максимального ускорения, ΔP_m – местные потери давления в канале, $\Delta P_{уск}$ – потери давления, связанные с преодолением инерционных сил при ускорении топлива, ΔP_c – потери давления в случае самотяги.

Необходимое давление на входе в насос (ТНА – турбонасосный агрегат) предлагается считать по формуле:

$$P_{вхТНА}^* = P_{выхПН}^* - \Delta P, \quad (5)$$

где $P_{выхПН}^*$ – давление на выходе из подкачивающего насоса.

Надкавитационный напор системы $NPSHa$ рассчитывается по формуле:

$$NPSHa = \frac{P_{вхТНА}^* - P_{н.п.}}{\rho g}, \quad (6)$$

где $P_{н.п.}$ – давление насыщенных паров метана на входе в ТНА.

Таким образом, используя выражения (3)–(6) можно выявить отличие реального надкавитационного напора в условиях ускорения течения от надкавитационного напора, полученного квазистационарным подходом.

Для работы ТНА топливных систем на альтернативных видах топлив параметр $NPSHa$ является одной из ключевых. Так, если рассчитанный по квазистационарному подходу значение $NPSHa$ будет существенно отличаться от $NPSHa$, рассчитанному с учетом влияния гидродинамической нестационарности потока, то это может привести к потере к кавитации в магистралях топливной системы и потере устойчивой работы ТНА.

Сравнение потерь давления в топливных магистралях при течении метана при нестационарном и квазистационарном расчете представлено на рис. 2 и рис. 3. Расчеты отличаются диаметром топливопровода.

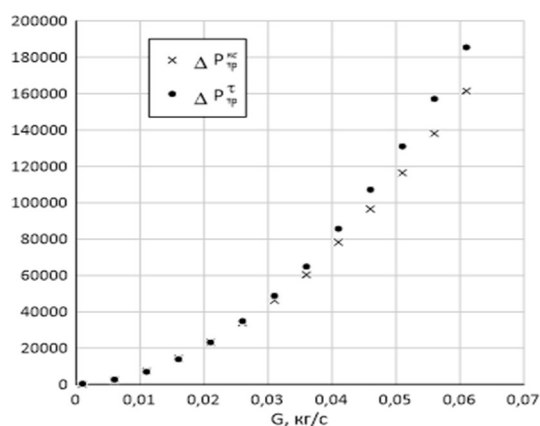


Рис. 2. Потери давления на трения в зависимости от расхода жидкости в трубопроводе $d = 5$ мм, $L = 3,835$ м: ΔP_{tr}^{τ} – с учетом влияния нестационарности потока; $\Delta P_{tr}^{\kappa c}$ – без учета влияния нестационарности (квазистационарный подход)

Обсуждение

Анализ графиков (рис. 2 и 3) показывает, что нестационарный эффект на потери давления при ускорении потока более заметен в каналах с меньшим диаметром, а также то, что потери давления растут с ростом уровня расхода. Даже при незначительных расходах $G = 0,06$ кг/сек (рис. 2) отличие от квазистационарного подхода составит около 10 %. Стоит отметить, что в современных авиационных ГТД расход топлива при переходе с режима малого газа на взлетный составит 1–2 кг/сек. Т. о. нестационарное воздействие будет существенно больше, чем тем примеры, которые приведены на графиках выше.

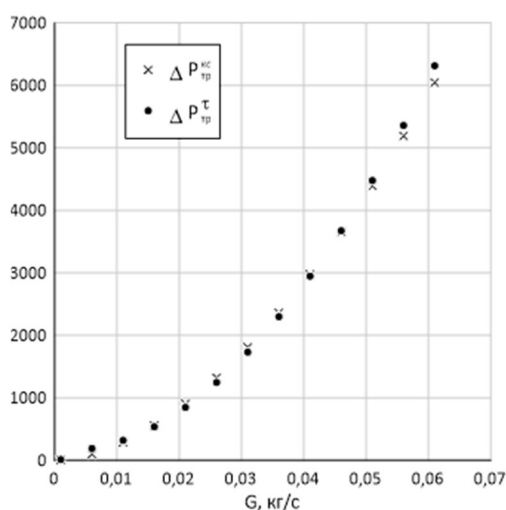


Рис. 3. Потери давления на трения в зависимости от расхода жидкости в трубопроводе $d = 10$ мм, $L = 3,835$ м: ΔP_{tr}^{τ} – с учетом влияния нестационарности потока; $\Delta P_{tr}^{\kappa c}$ – без учета влияния нестационарности (квазистационарный подход)

Заключение

Представленная в работе расчетная модель, учитывающая влияние ускорения потока на коэффициент гидравлического сопротивления, имеет большое практическое значение в связи с повышением требований к надежности и расширением режимных параметров в двигателестроении. Особенно актуально применение нестационарных процессов в газотурбинных двигателях, работающих на криогенных топливах, где необходимо обеспечить стабильность состояния топлива и исключить его вскипание.

Результаты сопоставления вычислений с экспериментальными данными на воде подтверждают адекватность использованной модели. Особенно выделено воздействие ускорения потока на коэффициент гидравлического сопротивления, где расчеты продемонстрировали значительное увеличение этого коэффициента в начале роста расхода в заданных диапазонах. Также отмечается, что относительный коэффициент теплоотдачи капельных жидкостей (таких как вода и жидкий метан) снижается при увеличении скорости потока из-за изменения структуры турбулентного течения в условиях гидродинамической нестационарности.

Предложенная модель пригодна для практических вычислений в топливных системах современных газотурбинных двигателей, работающих на криогенном топливе. Однако авторы отмечают необходимость дальнейших исследований в области нестационарных течений криогенных жидкостей для создания более точных расчетных инженерных моделей.

Список источников

1. Kalinin E.K., Dreitser G.A. Unsteady convective heat transfer for turbulent flows of gases and liquids in tubes // International Journal of Heat and Mass Transfer. 1985. Т. 28. № 2. С. 361–369.
2. Dreitser G.A., Bukharkin V.B., Kraev V.M. et al. Experimental study of effect of hydrodynamic unsteadiness on a turbulent gas flow structure and heat transfer // Heat Transfer Research. 1998. Т. 3. С. 93.
3. Попов Д.Н. Об особенностях нестационарных потоков в трубах // Изв. вузов. Машиностроение. 1972. № 7. С. 78.
4. Валуева Е.П., Попов В.Н. Нестационарное турбулентное течение жидкости в круглой трубе // Известия Академии наук СССР. Механика жидкости и газа. 1993. № 5. С. 150.

5. Валуева Е.П. Гидродинамика и теплообмен при турбулентном течении жидкости в трубе в условиях монотонного изменения расхода во времени // ТБТ. 2005. Т. 43. В.2. 212–222 с.
6. Асланов А.Р., Краев В.М., Молчанов А.М. Модель расчета переходных процессов в криогенных топливных магистралях современных авиационных двигателей // Тепловые процессы в технике. 2023. Т. 15. № 4. С. 185–192.
7. Дрейцер Г.А., Краев В.М. Турбулентные течения газа при гидродинамической нестационарности // Красноярск: САА. 2001. 148 с.
8. Никифоров А.Н., Герасимов С.В. Изменение параметров турбулентного течения при ускорении и замедлении потока // Инженерно-физический журнал. 1985. №49(4). С. 533–539.
9. Лийв У.Р. О гидравлических закономерностях при замедленном движении жидкости в напорном цилиндрическом трубопроводе // Тр. Таллинского политехи, ин-та. 1965. Сер. А. № 223. С. 29.
10. Лийв У.Р. О гидравлических закономерностях при ускоренном движении жидкости в напорном цилиндрическом трубопроводе // Тр. Таллинского политехи, ин-та. 1965. Сер. А. № 223. С. 43.
2. Dreitser GA, Bukharkin VB, Kraev VM et al. Experimental study of effect of hydrodynamic unsteadiness on a turbulent gas flow structure and heat transfer. *Heat Transfer Research*. 1998;3:93.
3. Popov D.N. On the features of unsteady flows in pipes. *Izv. vuzov. Mashinostroenie*. 1972;7:78. (In Russ.).
4. Valueva E.P., Popov V.N. Unsteady turbulent fluid flow in a round tube. *Izvestiya Akademii nauk SSSR. Mekhanika zhidkosti i gaza*. 1993;(5):150. (In Russ.).
5. Valueva E.P.. Hydrodynamics and heat transfer during turbulent fluid flow in a pipe under conditions of monotonous flow rate change over time. *TVT*. 2005;43(2): 212–222. (In Russ.).
6. Aslanov AR, Kraev VM, Molchanov AM. A model for calculating transients in cryogenic fuel lines of modern aircraft engines. *Thermal processes in engineering*. 2023; 15(4):185–192. (In Russ.).
7. Dreitser GA, Kraev VM. *Turbulent gas flows with hydrodynamic instability*. Krasnoyarsk: SAA. 2001. 148 p. (In Russ.).
8. Nikiforov AN, Gerasimov SV. Changing the parameters of the turbulent flow during acceleration and deceleration of the flow. *Inzhenerno-fizicheskii zhurnal*. 1985;(49(4)): 533–539. (In Russ.).
9. Liiv UR. On hydraulic patterns in slow motion of fluid in a pressure cylindrical pipeline. *Tr. Tallinskogo politekhi, in-ta*. 1965;(223):29. (In Russ.).
10. Liiv UR. On hydraulic patterns during accelerated fluid movement in a pressure cylindrical pipeline. *Tr. Tallinskogo politekhi. in-ta*. 1965;(223):43. (In Russ.).

References

1. Kalinin EK, Dreitser GA. Unsteady convective heat transfer for turbulent flows of gases and liquids in tubes. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 1985; 28(2):361–369.