

Научная статья
УДК 536.423
<https://doi.org/10.24143/2073-1574-2025-1-81-87>
EDN DWGCGC

Расчет геометрических характеристик ленточного турбулизатора для обеспечения условий полного смачивания внутренней поверхности при движении парожидкостной смеси в горизонтальной трубе

***Петр Алексеевич Альбеков[✉], Владимир Григорьевич Букин,
Андрей Юрьевич Кузьмин***

*Астраханский государственный технический университет,
Астрахань, Россия, albekov.p.a@list.ru[✉]*

Аннотация. Процессы кипения в современном мире имеют широкое распространение. В аппаратах холодильной техники наиболее часто применяемым является тип кипения при вынужденной конвекции, в частности при течении двухфазного потока внутри труб, характерной особенностью которого является то, что интенсивность теплообмена в нем зависит не только от теплового потока, свойств жидкости и давления, но и от гидродинамической структуры потока. Последняя, в свою очередь, зависит от свойств жидкости, давления, расположения трубы (угла наклона оси к горизонту), скорости вынужденной циркуляции, содержания пара в потоке, диаметра трубопровода, а также наличия интенсификаторов. Одним из способов повышения интенсивности теплообмена является включение в конструкцию интенсификаторов, наличие которых может значительно уменьшить размеры теплообменного оборудования, обеспечить большую тепловую эффективность и, возможно, снизить эксплуатационные затраты и стоимость изготовления. Рассматривается включение в трубопровод закрученной ленточной вставки, представлена математическая модель распределения сил, действующих на единицу жидкости, движущейся в горизонтальной трубе с закрученной ленточной вставкой – интенсификатором. Проведен расчет минимальной степени закручивания ленточного турбулизатора по длине трубопровода, определены границы режимов течения (снарядный, волновой, переходный, расслоенный) парожидкостной смеси внутри трубопровода с закрученной ленточной вставкой. Представлены результаты минимальной степени закручивания ленточных турбулизаторов для значений массовых скоростей $w_r = 25, 50, 100$ кг/(м²·с). Осуществлен анализ соответствия графических зависимостей физическому представлению процесса движения парожидкостной смеси в горизонтальном трубопроводе с ленточным турбулизатором.

Ключевые слова: двухфазные потоки, движение закрученного потока, турбулизатор, интенсификатор, теплообменный аппарат

Для цитирования: Альбеков П. А., Букин В. Г., Кузьмин А. Ю. Расчет геометрических характеристик ленточного турбулизатора для обеспечения условий полного смачивания внутренней поверхности при движении парожидкостной смеси в горизонтальной трубе // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. 2025. № 1. С. 81–87. <https://doi.org/10.24143/2073-1574-2025-1-81-87>. EDN DWGCGC.

Original article

Calculation of geometric characteristics of a belt turbulator to ensure conditions for complete wetting of the inner surface during the movement of a vapor-liquid mixture in a horizontal pipe

Petr A. Albekov[✉], Vladimir G. Bukin, Andrey Yu. Kuzmin

*Astrakhan State Technical University,
Astrakhan, Russia, albekov.p.a@list.ru[✉]*

Abstract. Boiling processes are widespread in the modern world. In refrigeration equipment, the most commonly used type of boiling is forced convection, in particular, when a two-phase flow occurs inside pipes. A characteristic feature

of this type is that the intensity of heat exchange in it depends not only on the heat flow, liquid properties and pressure, but also on the hydrodynamic structure of the flow. The latter in turn depends on the liquid properties, pressure, pipe location (angle of the axis to the horizon), forced circulation rate, steam content in the flow, pipeline diameter, and the presence of intensifiers. One way to increase the intensity of reheat exchange is to include intensifiers in the design, the presence of which can significantly reduce the size of heat exchange equipment, provide greater thermal efficiency and, possibly, reduce operating costs and manufacturing costs. The inclusion of a swirled tape insert in a pipeline is considered, presents a mathematical model of the distribution of forces acting on a unit of liquid moving in a horizontal pipe with a swirled tape insert – an intensifier. The minimum degree of swirling of the tape turbulator along the pipeline length is calculated, the boundaries of the flow regimes (slug, wave, transitional, stratified) of the vapor-liquid mixture inside the pipeline with a swirled tape insert are determined. The results of the minimum degree of swirling of tape turbulators for the values of mass velocities $\omega\rho = 25, 50, 100 \text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ are presented. An analysis of the correspondence of graphical dependencies to the physical representation of the process of movement of the vapor-liquid mixture in a horizontal pipeline with a tape turbulator is carried out.

Keywords: two-phase flows, swirling flow motion, turbulator, intensifier, heat exchanger

For citation: Albekov P. A., Bukin V. G., Kuzmin A. Yu. Calculation of geometric characteristics of a belt turbulator to ensure conditions for complete wetting of the inner surface during the movement of a vapor-liquid mixture in a horizontal pipe. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine engineering and technologies.* 2025;1:81-87. (In Russ.). <https://doi.org/10.24143/2073-1574-2025-1-81-87>. EDN DWGCGC.

Введение

Теплообменные аппараты в современном мире широко используются в различных отраслях промышленности. Основополагающими факторами при их конструировании являются массогабаритные и энергетические показатели. Так, суммарная масса испарителя и конденсатора составляет от 50 до 70 % общей массы парокомпрессионных холодильных машин. Необратимые потери, обусловленные передачей теплоты при конечных разностях температур в аппаратах, составляют от 30 до 50 % общих энергетических затрат холодильной машины. С учетом изложенного уменьшение массы и увеличение энергоэффективности теплообменных аппаратов остается актуальной проблемой, наиболее перспективным путем решения которой является интенсификация теплообмена.

Интенсивность процесса теплоотдачи при движении парожидкостной смеси в горизонтальной трубе зависит от геометрических характеристик трубы, тепловой нагрузки, давления, скорости движения паровой и жидкостной фаз, свойств холодильного агента, режима течения жидкости, который в свою очередь задает величину смоченной поверхности. Для испарителей холодильных машин наиболее характерными являются снарядный, расслоенный и волновой режимы течения [1]. При таких режимах течения теплота отводится слабо ввиду того, что площадь омываемой поверхности невелика, в частности при расслоенном режиме течения жидкость течет по дну горизонтальной трубы, а при волновом – жидкостью периодически омывается большая часть поверхности.

В настоящее время существуют различные методы интенсификации теплообмена, большинство которых основано на увеличении поверхности теплообмена (использование ребер различной формы),

воздействию на парожидкостную смесь: акустическому, механическому (изменению положения поверхности в пространстве, вибрации поверхности), гидродинамическому (включению в трубопровод вставок различного типа), а также с помощью магнитного или электрического поля. Сравнение вышеуказанных методов интенсификации свидетельствует о том, что в холодильной и криогенной технике наиболее целесообразно использовать ленточные турбулизаторы, принцип действия которых основан на увеличении смоченной хладоном поверхности теплообмена [2]. При этом определение геометрических характеристик закрученных ленточных вставок соответствующим конкретным условиям остается нерешенной задачей.

Одним из методов решения данной задачи является формирование математической модели, включающей в себя силы, действующие на единицу жидкости, в горизонтальной трубе с ленточным турбулизатором.

Модель движения парожидкостной смеси с ленточной вставкой

Рассмотрим модель, представленную на рис. 1. Трубопровод разделен ленточным турбулизатором, между ним и стенкой трубопровода протекает жидкость. На единицу жидкости постоянно действуют силы поверхностного натяжения, трения, инерции и тяжести, также следует учесть, что по пути движения жидкость с паром претерпевают фазовые превращения.

В целях формирования математической модели вышеуказанного процесса необходимо ввести следующие допущения:

- температура на всем рассмотренном участке постоянна и равна температуре насыщения;
- сила Кориолиса и радиальная составляющая

скорости отсутствует ввиду того, что единица жидкости движется по постоянной траектории;

– между стенками и парожидкостной смесью теплообмен отсутствует.

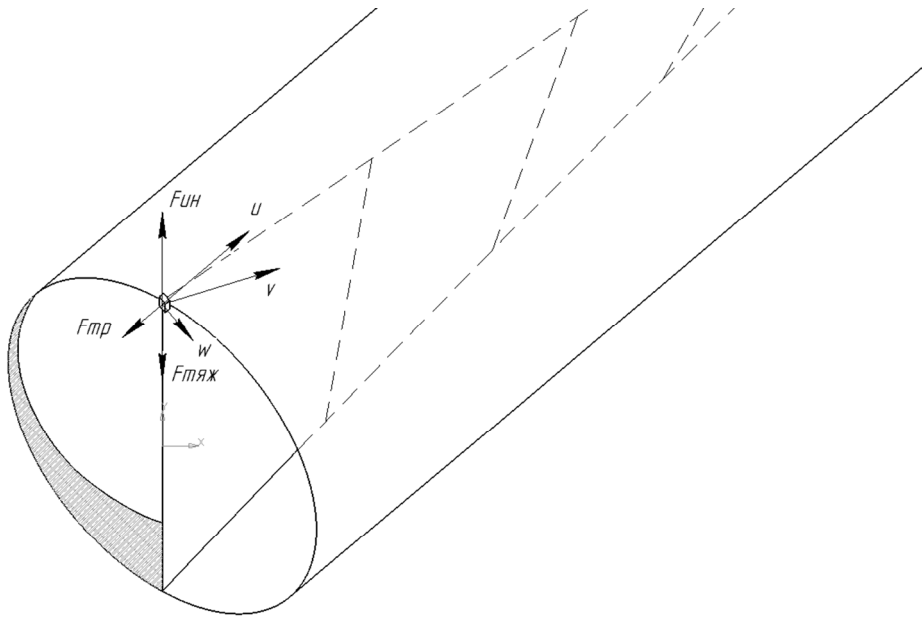


Рис. 1. Схема движения двухфазного закрученного потока:

$F_{ин}$ – сила инерции, действующая на пленку жидкости; $F_{тяж}$ – сила тяжести; $F_{тр}$ – сила трения

Fig. 1. Diagram of the motion of a two-phase swirling flow: F_{in} is the force of inertia acting on the liquid film; F_{gr} is gravity; F_{fr} is friction

Ранее аналогичная модель была рассмотрена при определении доли смоченного периметра при движении парожидкостной смеси с интенсификатором в работе [3].

Таким образом, задача сводится к установлению соотношения сил, действующих на единицу жидкости, при котором жидкость под силой инерции, преодолевая силу тяжести, будет находиться в крайней верхней точке трубопровода.

Меру взаимодействия силы тяжести и силы инерции примем из работы [4]:

$$\frac{\rho^i \omega_0^2}{g \rho^i l}, \quad (1)$$

где ρ^i – плотность i -й фазы; ω_0^i – скорость движения i -й фазы; g – ускорение свободного падения, m/s^2 ; l – линейный размер пленки жидкости, м.

В качестве линейного размера пленки жидкости в соответствии с работой [5] можно принять постоянную Лапласа:

$$l \sim \sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho' - \rho'')}} \quad (2)$$

где σ – коэффициент поверхностного натяжения,

H/m ; ρ' и ρ'' – плотность жидкости и плотность пара соответственно, kg/m^3 .

Подставляя значение линейного размера (2) в выражение (1), можно получить критерий вида:

$$\ddot{k} = \frac{\rho' \omega_0^2}{\sqrt{g \sigma (\rho')^2 / (\rho' - \rho'')}}.$$

Данный критерий устойчивости газожидкостных систем был введен С. С. Кутателадзе, он характеризует условие начала деформации поверхности раздела фаз и, соответственно, структурных изменений в существующей газожидкостной системе под воздействием поверхностного напора, силы тяжести и поверхностного натяжения.

Модифицируя безразмерный комплекс \ddot{k} , который представляет собой соотношение между прижимающей инерционной массовой силой $F_{ин}$ и силой тяжести $F_{тяж}$, с учетом криволинейного характера движения можем получить уравнение вида:

$$\ddot{k} = \frac{\rho' R}{\sqrt{g \sigma (\rho')^2 / (\rho' - \rho'')}} \left(\frac{2 \sin \cdot \omega \rho (1-x)}{d \cdot \rho' (1-\varphi)} \right)^2,$$

где R – радиус трубопровода, м; ϕ – истинное объемное паросодержание.

Условием существования сплошной жидкостной пленки, которая обеспечивает полное смачивание, является выполнение неравенства $\ddot{k} \geq 1$.

Смачиваемость внутренней стенки трубы жидкостью в рассматриваемом сечении будет определяться и углом закрутки ленточной вставки ϕ . При этом наличие сплошной жидкостной пленки будет обеспечено при условии:

$$\phi \geq \arcsin \sqrt{R \sqrt{g \frac{\sigma}{\rho' - \rho''}} \cdot \frac{\rho'(1-\phi)}{\omega \rho(1-x)}}.$$

Отсюда следует, что для обеспечения условий полного смачивания внутренней поверхности трубы ленточный турбулизатор должен иметь степень закручивания:

$$s/d \leq \frac{\pi}{\operatorname{tg} \left[\arcsin \left(\sqrt{R \sqrt{g \frac{\sigma}{\rho' - \rho''}} \cdot \frac{\rho'(1-\phi)}{\omega \rho(1-x)}} \right) \right]}. \quad (3)$$

Следует отметить, что аналогичная формула получена в работе [1], в дальнейшем указанная зависимость использовалась авторами для определения смоченного периметра и расчета коэффициента теплоотдачи при кипении холодильного агента. При этом расчет изменения минимальной степени закручивания по длине трубопровода не проводился, сопоставление полученных данных с представлением

о движении двухфазного потока в трубопроводе с ленточной вставкой не осуществлялось.

Расчет минимальной степени закручивания ленточного турбулизатора

В целях проверки полученного выражения – сравнение его показателей с имеющимися представлениями в отношении картины течения двухфазного потока внутри горизонтальной трубы – осуществлено математическое моделирование процесса по полученной формуле (3) для следующих условий: температура $t = -15$ °С; холодильный агент R407C; длина трубопровода $l = 0, 0,1-3,8$ м; диаметр трубопровода $d = 0,017$ м; удельный тепловой поток $q = 6\,000, 12\,500, 22\,500$ Вт/м²; массовая скорость $\omega \rho = 25, 75, 100$ кг/(м²·с).

Тепловая нагрузка подобрана таким образом, чтобы для соответствующей массовой скорости массовое паросодержание холодильного агента менялось в диапазоне от 0 до 1 (обеспечивалось полное выкипание).

В целях установления целесообразности применения турбулизаторов, а также понимания физических процессов, происходящих в потоке парожидкостной смеси, получены графические зависимости степени закручивания ленточного турбулизатора по длине трубопровода для различных массовых скоростей (рис. 2–4). Кроме этого, для каждой из графических зависимостей определены режимы течения двухфазного потока в соответствии с картой режимов, представленной в работе [3].

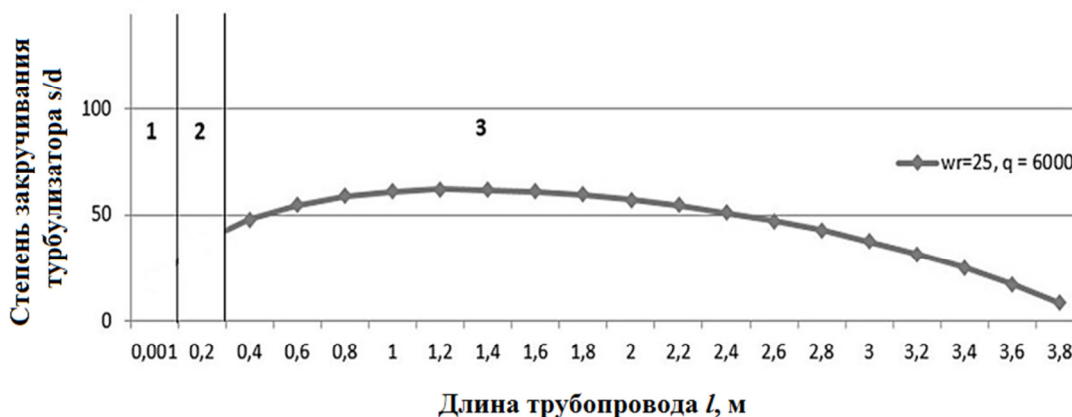


Рис. 2. Изменение минимальной степени закручивания ленточного турбулизатора по длине трубопровода для массовой скорости $\omega \rho = 25$ кг/(м²·с): 1 – снарядный; 2 – волновой; 3 – расслоенный режим течения

Fig. 2. Change in the minimum degree of twisting of the belt turbulator along the length of the pipeline for a mass velocity $\omega \rho = 25$ кг/(м²·с): 1 – projectile; 2 – wave; 3 – stratified flow mode

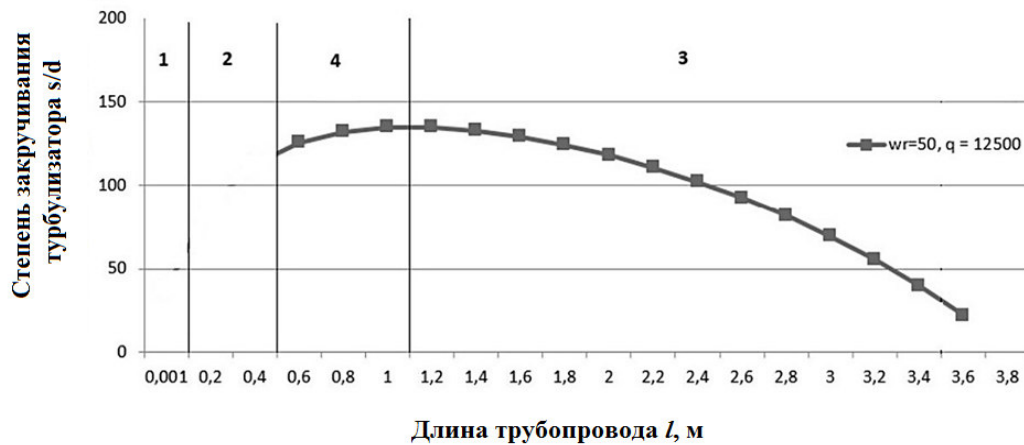


Рис. 3. Изменение минимальной степени закручивания ленточного турбулизатора по длине трубопровода для массовой скорости $\omega\rho = 50 \text{ кг/(м}^2\cdot\text{с)}$: 1 – снарядный; 2 – волновой; 3 – расслоенный; 4 – переходный режим течения

Fig. 3. Change in the minimum degree of twisting of the belt turbulator along the length of the pipeline for a mass velocity of $\omega\rho = 50 \text{ kg/(m}^2\cdot\text{s)}$: 1 – projectile; 2 – wave; 3 – stratified; 4 – transient flow mode

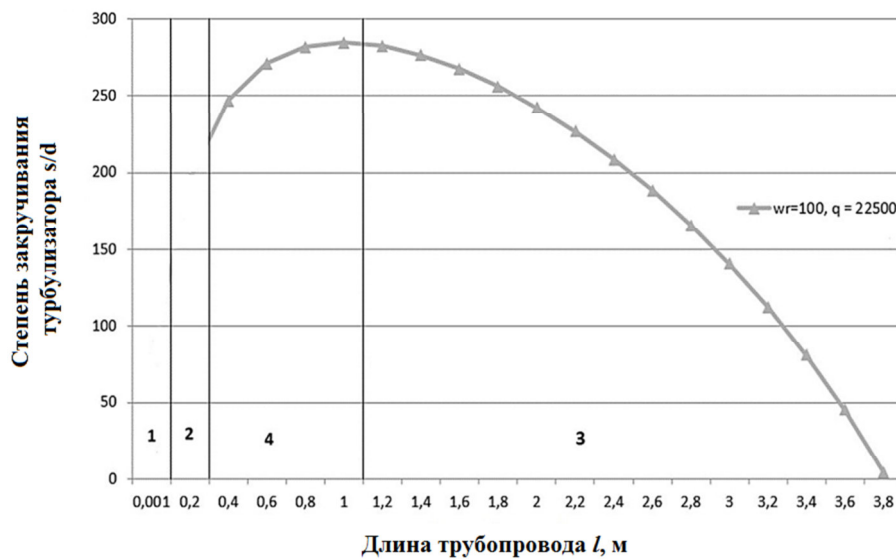


Рис. 4. Изменение минимальной степени закручивания ленточного турбулизатора по длине трубопровода для массовой скорости $\omega\rho = 100 \text{ кг/(м}^2\cdot\text{с)}$: 1 – снарядный; 2 – волновой; 3 – расслоенный; 4 – переходный режим течения

Fig. 4. Change in the minimum degree of twisting of the belt turbulator along the length of the pipeline for a mass velocity of $\omega\rho = 100 \text{ kg/(m}^2\cdot\text{s)}$: 1 – projectile; 2 – wave; 3 – stratified; 4 – transient flow mode

Анализ результатов расчета минимальной степени закручивания ленточного турбулизатора

Для понимания результатов проведенного моделирования процесса следует отметить, что большее значение шага ленточной вставки s соответствует меньшей степени закрутки ленточного турбулизатора. Из этого следует, что на единицу длины трубопровода ленточный турбулизатор будет

делать меньше оборотов.

Анализируя данные зависимости, можно сделать вывод о том, что для всех принятых значений массовых скоростей график функции $s/d = f(l)$ ведет себя одинаково, с увеличением длины трубопровода (ростом массового паросодержания) степень закрутки сначала незначительно уменьшается, затем возрастает.

Указанная зависимость хорошо соответствует физическому представлению процесса. Так, с увеличением количества выкипевшей жидкости увеличивается скорость паровой фазы, соответственно, растет инерционная составляющая, действующая на единицу жидкости. Ввиду того, что жидкой фазы становится меньше, обеспечить условия полного омывания поверхности при движении в горизонтальном трубопроводе с ленточной вставкой значительно сложнее. Исходя из этого, можно сделать вывод о том, что для различных участков трубопровода необходима различная степень закрутки турбулизатора. В начале движения парожидкостной смеси в основном наблюдается картина сна-

рядного либо волнового режимов течения, при которых большая часть поверхности трубопровода омывается холодильным агентом, в этом случае теплообмен происходит между жидким хладонем и стенкой трубы. Соответственно, наличия вставки, меняющей гидродинамику потока и увеличивающей площадь поверхности, омываемой холодильным агентом, не требуется.

При сопоставлении зависимостей, характеризующих изменение минимальной степени закручивания ленточного турбулизатора по длине трубопровода для различных массовых скоростей получены следующие результаты (рис. 5).

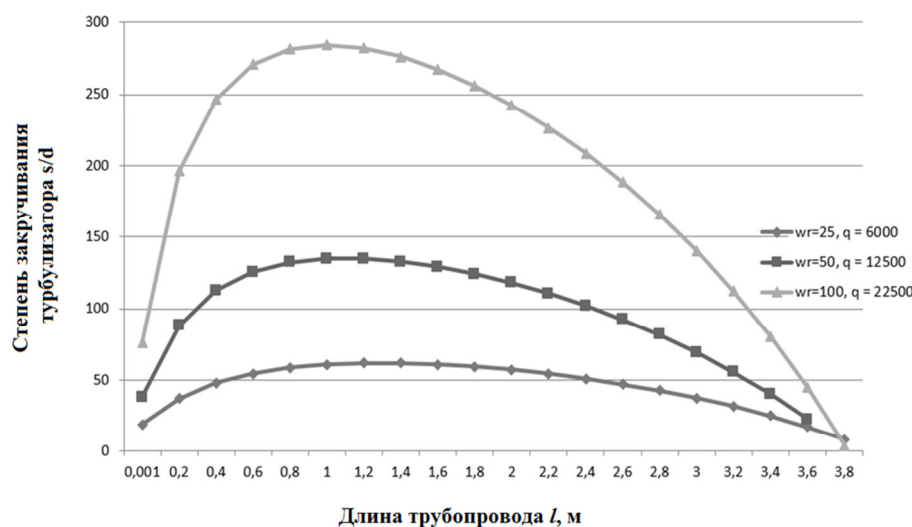


Рис. 5. Изменение минимальной степени закручивания ленточного турбулизатора по длине трубопровода для значений массовых скоростей $w_r = 25, 50, 100$ кг/(м²·с)

Fig. 5. Change in the minimum degree of twisting of the belt turbulator along the length of the pipeline for the values of mass velocities $w_r = 25, 50, 100$ kg/(m²·s)

Таким образом, с увеличением значений массовой скорости степень закрутки турбулизатора уменьшается, что соответствует представлению физической картины процесса, т. к. повышается инерционная составляющая сил, действующих на единицу жидкости.

Заключение

Проведенный расчет геометрических характеристик ленточного турбулизатора для обеспечения

условий полного смачивания внутренней поверхности при движении парожидкостной смеси в горизонтальной трубе демонстрирует зависимость степени закручивания турбулизатора, которая изменяется не только по длине трубопровода, но и соответственно массовым скоростям. Данные расчетные зависимости возможно использовать на практике в целях интенсификации теплообмена при проектировании холодильных машин с внутритрубным кипением.

Список источников

1. Букин В. Г., Шуршев В. Ф., Данилова Г. Н. Экспериментальное исследование теплообмена при кипении смеси R22/R142b в испарителе холодильной машины // Холодильн. техника. 1996. № 3. С. 10–11.
2. Букин В. Г., Кузьмин А. Ю., Ежов А. В. Исследование интенсивности теплоотдачи и механизма процесса

3. Минеев Ю. В., Букин В. Г., Кузьмин А. Ю. Исследование влияния турбулизаторов на гидродинамику двухфазного потока при его вынужденном движении кипения бинарных неазеотропных смесей // Совершенствование энергетических систем и комплексов: сб. науч. тр. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 2000. 89 с.

внутри горизонтальных труб // XXIV Рос. шк. по проблемам науки и технологии, посвященная 80-летию со дня рождения акад. В. П. Макеева: сб. тез. конф. (Миасс, 22–24 июля 2004 г.). Екатеринбург: Изд-во УрО РАН, 2004. 165 с.

4. Кутателадзе С. С., Стырикович М. А. Гидродина-

мика газожидкостных систем. М.: Энергия, 1976. 296 с.

5. Букин В. Г., Кузьмин А. Ю., Минеев Ю. В. Экспериментальное исследование эффективности применения ленточных турбулизаторов при кипении альтернативных холодильных агентов в горизонтальных трубах // Вестн. Астрахан. гос. техн. ун-та. 2006. № 2 (31). С. 176–182.

References

1. Bukin V. G., Shurshev V. F., Danilova G. N. Eksperimental'noe issledovanie teploobmena pri kipenii smesi R22/R142b v isparitele kholodil'noi mashiny [Experimental study of heat transfer during boiling of the R22/R142b mixture in the evaporator of a refrigerating machine]. *Kholodil'naya tekhnika*, 1996, no. 3, pp. 10–11.

2. Bukin V. G., Kuz'min A. Yu., Ezhov A. V. Issledovanie intensivnosti teplootdachi i mekhanizma protsessa kipeniia binarnykh neazeotropnykh smesei [Investigation of the intensity of heat transfer and the mechanism of the boiling process of binary non-azeotropic mixtures]. *Sovershenstvovanie energeticheskikh sistem i kompleksov: sbornik nauchnykh trudov*. Saratov, Izd-vo Saratovskogo universiteta, 2000. 89 p.

3. Mineev Yu. V., Bukin V. G., Kuz'min A. Yu. Issledovanie vliianiia turbulizatorov na gidrodinamiku dvukhfaznogo potoka pri ego vynuuzhdennom dvizhenii vnutri gorizonta'l'nykh trub. XXIV Rossiiskaia shkola po problemam nauki i tekhnologii, posviashchennaia 80-letiiu so

dnia rozhdeniia akademika V. P. Makeeva [Investigation of the effect of turbulators on the hydrodynamics of a two-phase flow during its forced movement inside horizontal pipes. XXIV Russian School of Science and Technology, dedicated to the 80th anniversary of the birth of Academician V. P. Makeev]. *Sbornik tezisov konferentsii (Miass, 22–24 iuliia 2004 g.)*. Ekaterinburg, Izd-vo UrO RAN, 2004. 165 p.

4. Kutateladze S. S., Styrikovich M. A. *Gidrodinamika gazozhidkostnykh sistem* [Hydrodynamics of gas-liquid systems]. Moscow, Energiia Publ., 1976. 296 p.

5. Bukin V. G., Kuz'min A. Yu., Mineev Yu. V. Eksperimental'noe issledovanie effektivnosti primeniia lentochnykh turbulizatorov pri kipenii al'ternativnykh kholodil'nykh agentov v gorizonta'l'nykh trubakh [An experimental study of the effectiveness of using belt turbulators during boiling of alternative refrigerating agents in horizontal pipes]. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2006, no. 2 (31), pp. 176–182.

Статья поступила в редакцию 29.12.2024; одобрена после рецензирования 16.02.2025; принята к публикации 24.02.2025
The article was submitted 29.12.2024; approved after reviewing 16.02.2025; accepted for publication 24.02.2025

Информация об авторах / Information about the authors

Петр Алексеевич Альбеков – аспирант кафедры теплоэнергетики и холодильных машин; Астраханский государственный технический университет; albekov.p.a@list.ru

Владимир Григорьевич Букин – доктор технических наук, профессор; профессор кафедры теплоэнергетики и холодильных машин; Астраханский государственный технический университет; bukinvg@mail.ru

Андрей Юрьевич Кузьмин – кандидат технических наук, доцент; доцент кафедры теплоэнергетики и холодильных машин; Астраханский государственный технический университет; kuzmin-astu@yandex.ru

Petr A. Albekov – Postgraduate Student of the Department of Thermal Power Engineering and Refrigeration Machines; Astrakhan State Technical University; albekov.p.a@list.ru

Vladimir G. Bukin – Doctor of Technical Sciences, Professor; Professor of the Department of Thermal Power Engineering and Refrigeration Machines; Astrakhan State Technical University; bukinvg@mail.ru

Andrey Yu. Kuzmin – Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor; Assistant Professor of the Department of Thermal Power Engineering and Refrigeration Machines; Astrakhan State Technical University; kuzmin-astu@yandex.ru

