

## **Эффективность газовой завесы в сверхзвуковом плоском сопле при щелевом тангенциальном вдуве**

**# 07, июль 2014**

**Васюков Г. К., Воробьева Е. А., Щеголев Н. Л.**

**УДК: 533.68 : 536.24**

Россия, МГТУ им. Баумана

[hork@inbox.ru](mailto:hork@inbox.ru)

[turbosh@power.bmstu.ru](mailto:turbosh@power.bmstu.ru)

### **Введение**

Разработка высокотемпературных энергетических установок различного назначения, авиационных ГТД, ракетной техники, импульсных двигателей, отвечающих требованиям высокой надежности, сопряжена с необходимостью тепловой, эрозионной и коррозионной защиты проточных частей от воздействия высокотемпературного и химически агрессивного потока. К одному из широко используемых способов надежной защиты стенки конструкции можно отнести тепломассообменную защиту при вдуве охладителя в пограничных слой параллельно основному потоку [1-6]. Использование этого вида защиты позволяет не только предохранять от разрушения (например, прогорания) элементы конструкции, но и управлять пограничным слоем, изменяя аэродинамические характеристики проточной части, что особенно важно при сверхзвуковом течении в различных устройствах и решетках турбомашин. Кроме того, завесу можно использовать для понижения температуры стенки, что является важной задачей в некоторых устройствах [7-12].

Применение газовых завес, создаваемых локальным или распределенным вдувом газа через щель или пористую поверхность, расположенных в зонах скачка уплотнения, позволяет повысить надежность работы установки при установившемся (расчетном) режиме работы конструкции. При переменных (нерасчетных) режимах, включая пуск установки и, иногда (исходя из конструктивных или технологических особенностей при создании установки) невозможно прогнозировать и осуществить вдув охладителя через щель или пористую поверхность в предполагаемых зонах возникновения скачков уплотнения. Тогда участки вдува располагаются на значительных расстояниях от «опасных зон», где режимы течения существенно отличаются от режима течения в рабочем участке. При этом необходимо корректно определить значение эффективности газовой завесы на всей длине поверхности проточной части в зависимости от типа завесы и расположения зоны вдува. Следует отметить, что, несмотря на широкое использование численных методов расчета, наибольшее распространение в практике расчетов течений и эффективности газовых завес

получили полуэмпирические методы, основанные на использовании интегральных соотношений импульса и энергии. Для их подтверждения и корректировки необходимо наличие экспериментальных данных в широком диапазоне параметров.

### Описание установки и результаты исследований

Все экспериментальные исследования проводились в сверхзвуковом плоском сопле с предвключенным дозвуковым участком постоянного сечения  $F_{\Pi} = (35 \times 70) \text{ мм}$ . Выходное сечения сопла имеет размеры  $F_{\text{вых}} = (35 \times 70) \text{ мм}$ , критическое сечение  $F_{\text{кр}} = (20 \times 70) \text{ мм}$ . Длина сопла – 200 мм. Расстояние от щели вдува до начала сопла 62,5 мм, высота щели –  $S = 0,5 \text{ мм}$ . Схема рабочего участка представлена на рис.1. Участку вдува предшествует предвключенный участок длиной 120 мм или 240 мм. Толщина стенок канала – 20 мм. Камера вдува, внутренняя стенка которой формирует плоский участок канала длиной 55 мм, теплоизолирована.

Рабочий участок выполнен из оптически прозрачного оргстекла, что позволяет наблюдать визуально картину течения. Рабочим телом в эксперименте является воздух с температурой 340...350 К и давлением 0,3...0,5 МПа, поступающий от компрессора. Величина расхода основного потока регулировалась в интервале 0,5...0,7 кг/с. Изменение расхода вдуваемого воздуха составляло 8...15 г/с, что соответствует скорости вдува в щели  $W_s = 90 \dots 190 \text{ м/с}$ . Контроль расчетного режима осуществлялся по отношению статического давления на выходе из сопла к полному давлению на входе  $\frac{P_{\text{ст}}}{P_0^*} = 0.13$ . Число Маха на выходе  $M=2$ .

В сечение входа и выхода сопла измерялись полные давления, профиль скорости и толщина пограничного слоя. На входе в сопло также замерялись распределения температуры по стенке канала и температура торможения ядра потока.

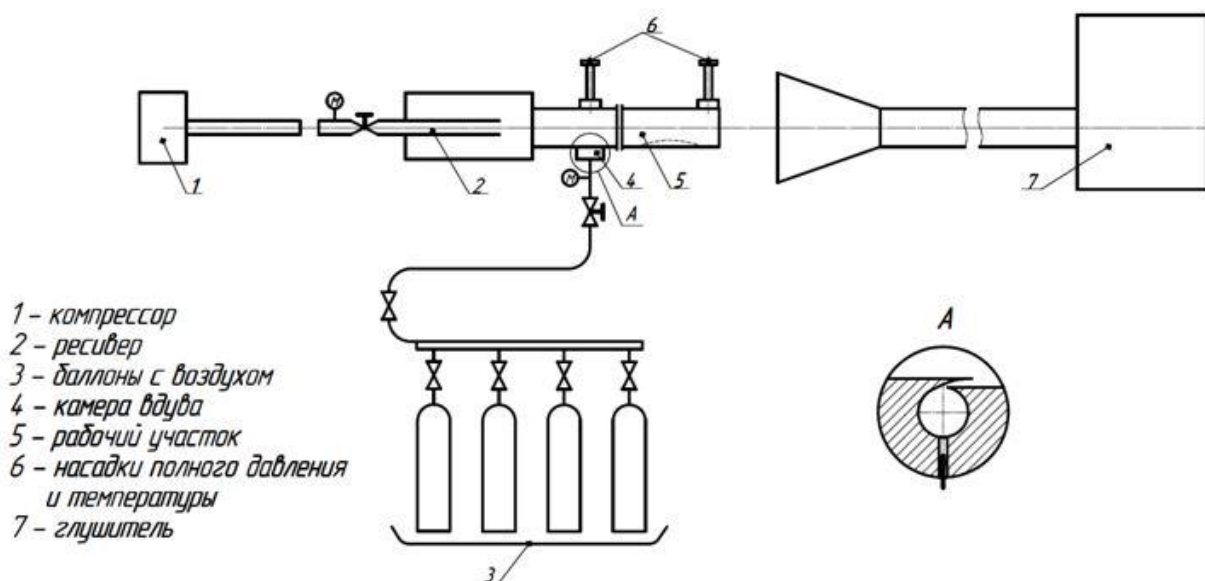


Рис.1 - Схема экспериментальной установки

Тепловые измерения по длине сопла проводились с помощью 30 хромель-копелевых термозондов, зачеканенных в медные цилиндры, расположенные заподлицо с поверхностью сопла. Предварительная тарировка термопар и установка холодного спая обеспечивали определение температуры с погрешностью  $0,2 \text{ град}$ . Утечки теплоты по проводам термозондов оценивались методом решения обратной задачи теплопроводности.

Методические исследования течения показали, что на входе в сопло пограничный слой является турбулентным и распределение скоростей в нем можно аппроксимировать степенной зависимостью  $\omega = \xi^{1/7}$  [6]. Проведенный методический эксперимент показал, что для определения параметров газа в ядре потока течение в сопле на расчетных режимах можно рассматривать как квазиодномерное и адиабатическое.

На рисунках 2 и 3 приведены результаты экспериментального исследования эффективности газовой завесы при щелевом тангенциальном вдуве на расчетном режиме. Экспериментально показано что, несмотря на удаленность сечения вдува от входного сечения сопла (более 100 калибров высоты щели) завесное охлаждение действует по всей длине сопла (более чем 300 калибров щели от сечения организации завесы) при интенсивных вдувах, что соответствует диапазону параметров вдува  $m_s = 0,64 \dots 2,10$ . Параметр вдува  $m_s$  определялся как отношение

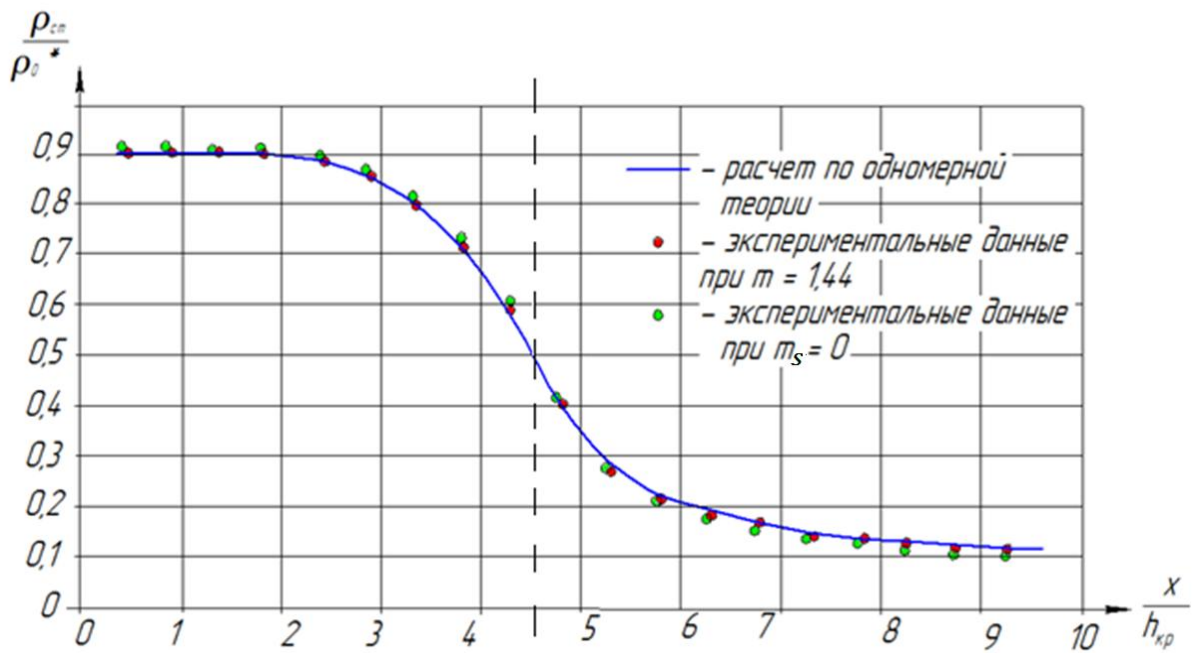
$$m_s = \frac{\rho_s W_s}{\rho_0 W_0}$$

где:  $\rho_s W_s$  – плотность и скорость вдуваемого газа;  $\rho_0 W_0$  – плотность и скорость основного потока.

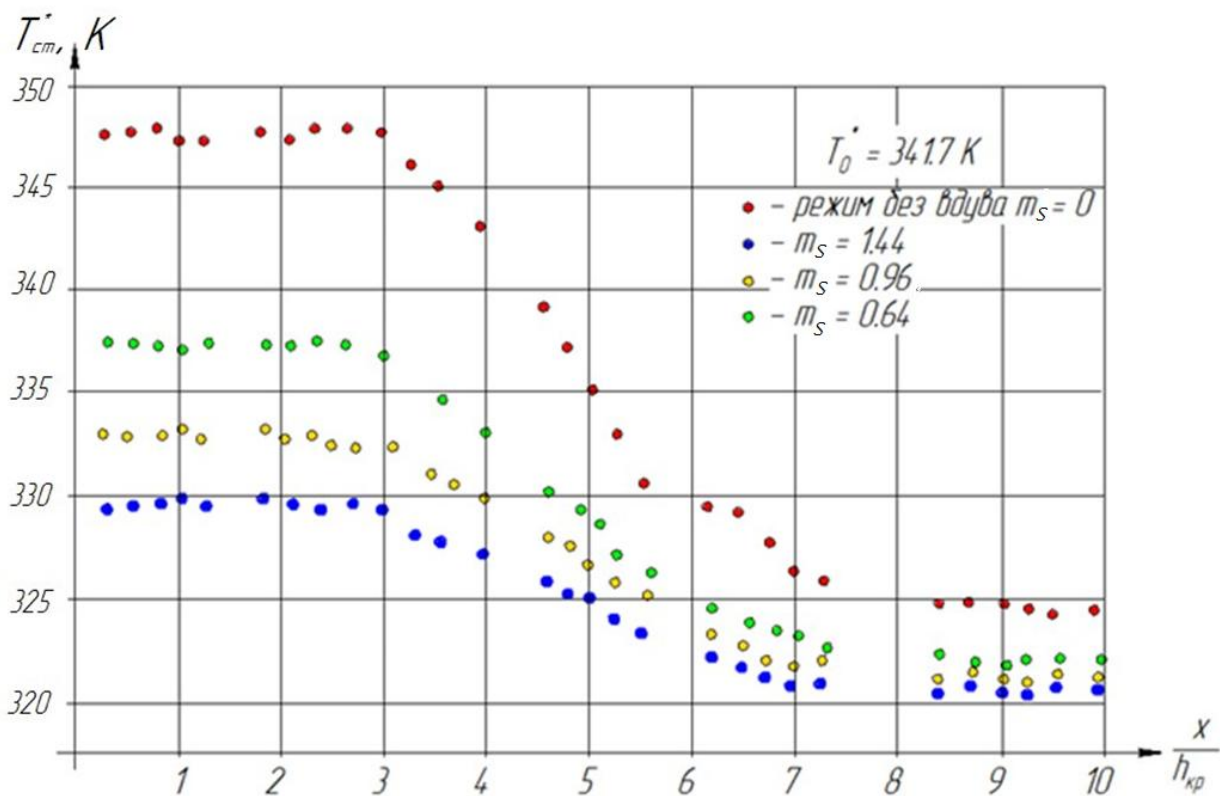
Из анализа экспериментальных данных, представленных на рис. 3 видно, что с увеличением параметра вдува происходит снижение температуры теплоизолированной стенки плоского сопла на расчетном режиме. Это соответствует известному факту о снижении коэффициента восстановления температуры при вдуве газа [13].

При использовании интегрального метода расчета для определения эффективности газовой завесы в сверхзвуковом сопле надо учитывать, что на распределение скорости в пограничном слое оказывают влияние такие возмущающие факторы, как вдув газа в пограничный слой, шероховатость стенки, сжимаемость, неізотермичность, градиент скорости потока, предвключенные участки теплообмена.

При определении эффективности газовой завесы будем считать, что течение в пограничном слое с газовой завесой определяется закономерностями пристенной турбулентности. Такой точки зрения придерживаются Хартнет, Эккерт, Биркебак, С.С. Кутателадзе, А.И. Леонтьев и другие (см., например [2, 6, 7, 12, 13]).



**Рис. 2** – Влияние щелевого вдува на распределение статического давления по длине сопла на расчетном режиме.



**Рис. 3** – Влияние холодного вдува на равновесную температуру теплоизолированной стенки плоского сопла на расчетном режиме

Для определения гидродинамических характеристик течения можно воспользоваться интегральным соотношением импульсов для плоского пограничного слоя в виде

$$\frac{dRe_{00}^{**}}{d\bar{x}} + Re_L f(1 + H) = \psi_{\infty} Re_L \frac{C_{f_0}}{2} \quad (1)$$

где:

$Re_{00}^{**} = \frac{\rho_0 W_0 \delta^{**}}{\mu_0}$  - число Рейнольдса по толщине потери импульса;

$Re_L = \frac{\rho_0 W_0 L}{\mu_0}$  - число Рейнольдса по длине сопла;

$f = \frac{\delta^{**}}{W_0} \frac{dW_0}{dx}$  - параметр градиента скорости;

$H = \frac{\delta^*}{\delta^{**}}$  - формпараметр;

$\bar{x} = \frac{x}{L}$  - относительная координата;

$L$  - характерный размер (длина сопла);

$\frac{C_{f_0}}{2} = \frac{2\tau_{cm}}{\rho_0 W_0^2}$  - коэффициент трения на пластине в «стандартных» условиях;

$\psi_{\infty} = \psi_m \cdot \psi_t \cdot \psi_{sh}$  - относительный закон трения, учитывающий влияние сжимаемости, неизотермичности и шероховатости.

Интегрируя это уравнение, получаем при заданных законах изменения температуры стенки и скорости на внешней границе пограничного слоя по координате  $x$  локальные значения Рейнольдса по толщине потери импульса:

$$Re_{00}^{**} = \exp\left(-\frac{J}{1+m}\right) \left[ (m+1)^{\frac{B}{2}} Re_{00} \int_{\bar{x}_1}^{\bar{x}} \psi_t \psi_m \left(\frac{\mu_s}{\mu_0}\right)^m \cdot U(1-U^2)^{\frac{1}{k-1}} \exp(J) d\bar{x} + C \right]^{\frac{1}{m+1}} \quad (2)$$

где:

$Re_{00} = \frac{\rho_0 W_{max} L}{\mu_0}$ ,  $J = (m+1) \int (1 + H_{кр}) \frac{dW_0}{W_0}$

$U = \frac{W_0}{W_{max}} = \lambda \sqrt{\frac{k-1}{k+1}}$  - безразмерная скорость;

$m = \frac{2n}{1+n}$ ,  $W_{max} = \sqrt{2i_{00}}$ ,  $H_{кр} = 2,41\psi^* + 1,38\Delta\psi - 0,52$

При наличии завесы константа  $C$  в выражении (2) определена параметрами вдуваемого газа:

$$C = \left[ Re_s \left( 1 - \frac{W_s}{W_0} \right) \right]^{m+1} \quad (3)$$

где  $Re_s = \frac{\rho_s W_s S}{\mu_s}$  - число Рейнольдса по параметрам вдуваемого газа;

При наличии предвключенного участка теплообмена значения константы  $C$  определены из условия аддитивности:

$$C = \left[ Re_S \left( 1 - \frac{W_S}{W_0} \right) + Re_{T01}^{**} \right]^{m+1} \quad (4)$$

где  $Re_{T01}^{**}$  - число Рейнольдса в конце предвключенного участка.

Для определения эффективности газовой завесы в плоском сопле интегральное соотношение энергии для двумерного пограничного слоя на непроницаемой плоской стенке примет вид:

$$\frac{dRe_T^{**}}{d\bar{x}} + \frac{Re_T^{**}}{\Delta T} \cdot \frac{d(\Delta T)}{d\bar{x}} = St_\infty \psi Re_L \quad (5)$$

где

$Re_T^{**}$  - число Рейнольдса, определенное по текущей толщине потери энергии  $\delta_T^{**}$ ;

$Re_L$  - число Рейнольдса, определенное по длине сопла;

$St_\infty$  - число Стентона для неизотермического, несжимаемого потока газа на пластине.

При сверхзвуковой скорости течения газа в условиях теплообмена необходимо учитывать влияние сжимаемости и неизотермичности.

В случае теплоизолированного сопла уравнение (5) примет вид :

$$\frac{dRe_T^{**}}{d\bar{x}} + \frac{Re_T^{**}}{\Delta T} \cdot \frac{d(\Delta T)}{d\bar{x}} = 0; \quad (6)$$

Интегрируя уравнение (5) и принимая во внимание консервативность закона теплообмена к изменению граничных условия получим после некоторых преобразований формулу для определения эффективности газовой завесы в плоском теплоизолированном сопле:

$$\theta = \left[ 1 + \frac{0,016 \beta^{1,25} \left( \frac{\mu_S}{\mu_0} \right)^{0,25} \left( \frac{k-1}{k+1} \right)^{0,5} \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{1}{k-1}} Re_{00} \int_{\bar{x}_1}^{\bar{x}} \psi_\infty \frac{h_{кр}}{h} d\bar{x}}{Re_S^{1,25}} \right]^{-0,8} \quad (7)$$

$$\beta = \left( \frac{\delta_T^{**}}{\delta^{**}} \right)_{x \rightarrow \infty} \rightarrow \frac{\int_0^1 \omega d\xi}{\int_0^1 \omega (1 - \omega) d\xi} \rightarrow 9$$

С учетом участка теплообмена перед соплом:

$$\theta = \left[ 1 + \frac{0,016 \beta^{1,25} \left( \frac{\mu_S}{\mu_0} \right)^{0,25} \left( \frac{k-1}{k+1} \right)^{0,5} \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{1}{k-1}} Re_{00} \int_{\bar{x}_1}^{\bar{x}} \psi_\infty \frac{h_{кр}}{h} d\bar{x}}{Re_{T1}^{**}} \right]^{-0,8} \quad (8)$$

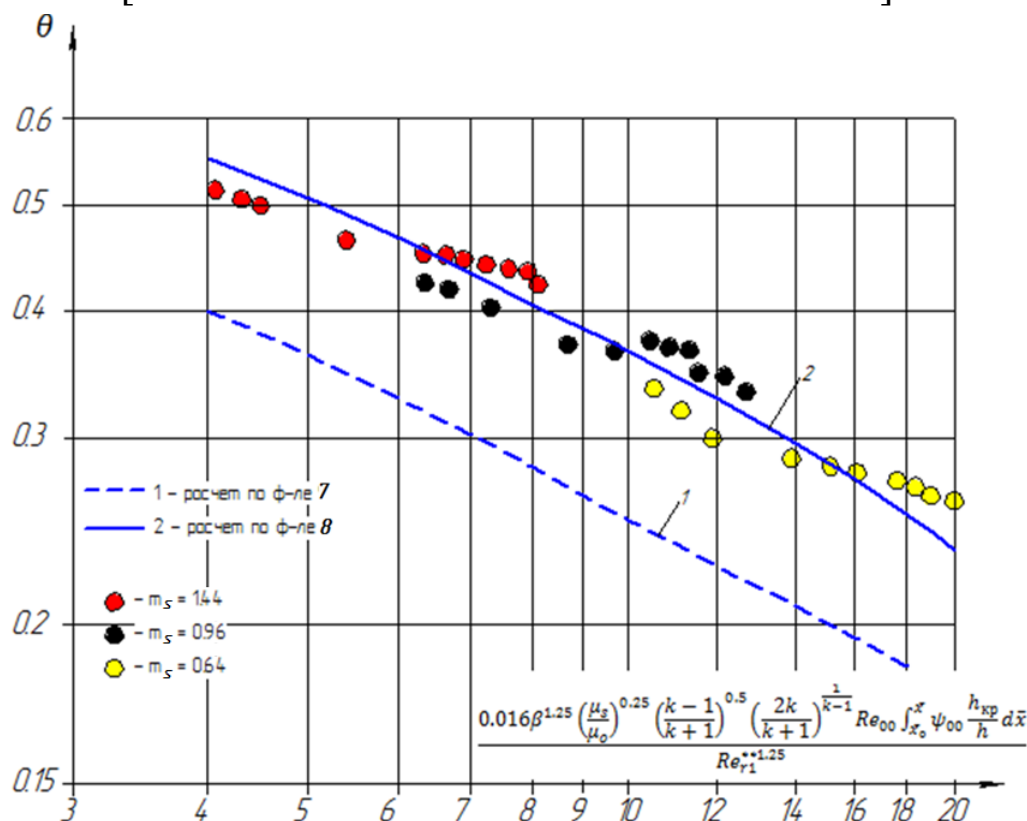
$$Re_{T1}^{**} = Re_S^{**} + Re_{T0}^{**}$$

Как видно из полученных экспериментальных данных (рис.4), наличие предвключенного участка теплообмена повышает эффективность газовой завесы на 20...30%.

Кроме того, анализ экспериментальных данных также показывает, что эффективность завесы возрастала на 15% при увеличении длины предвключенного теплоизолированного участка в два раза (в начальных сечениях сопла). При выходе из сопла влияние динамического пограничного слоя исчезало. На рисунке 5 показано влияние динамического пограничного слоя, образовавшегося на предвключенном теплоизолированном участке, на температуру стенки.

Эффективность газовой завесы возрастает при наличии предвключенного участка, так как градиент скорости  $dW/dy$  вблизи стенки меньше, чем при отсутствии предшествующего динамического слоя. Следовательно, завеса размывается менее интенсивно и ее эффективность возрастает. Формулу для определения эффективности газовой завесы в сопле с учетом влияния предвключенного теплоизолированного участка длиной  $x_0$  можно представить в виде:

$$\theta = \left[ 1 + \frac{0,016\beta^{1,25} \left(\frac{\mu_s}{\mu_0}\right)^{0,25} \left(\frac{k-1}{k+1}\right)^{0,5} \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{1}{k-1}} Re_{00} \int_{x_0}^x \left(\frac{\bar{x}-x_0}{\bar{x}}\right)^{0,086} \psi_{00} \frac{h_{kp}}{h} d\bar{x}}{(Re_s + Re_{T0}^{**})^{1,25}} \right]^{-0,8} \quad (9)$$



**Рис.4** - Экспериментальные данные по эффективности газовой завесы в плоском сопле на расчетном режиме с учетом предвключенного участка теплообмена

Экспериментальные значения эффективности газовой завесы определялись по формуле:

$$\theta = \frac{T_{ст}^* - T_{ст3}}{T_{ст}^* - T_s}$$

где

$T_{ст}^*$  - температура стенки сопла без завесы;

$T_{ст3}^*$  - температура стенки сопла с завесой;

$T_s$  - температура охладителя.



Результаты обобщения полученных опытных данных по эффективности газовой завесы на основе формулы (9) представлены на рис.6. обобщение опытных данных проведено с использованием безразмерного комплекса  $K$ . Согласование экспериментальных данных и расчета с учетом принятых рекомендаций подтверждает правомерность принятого подхода.

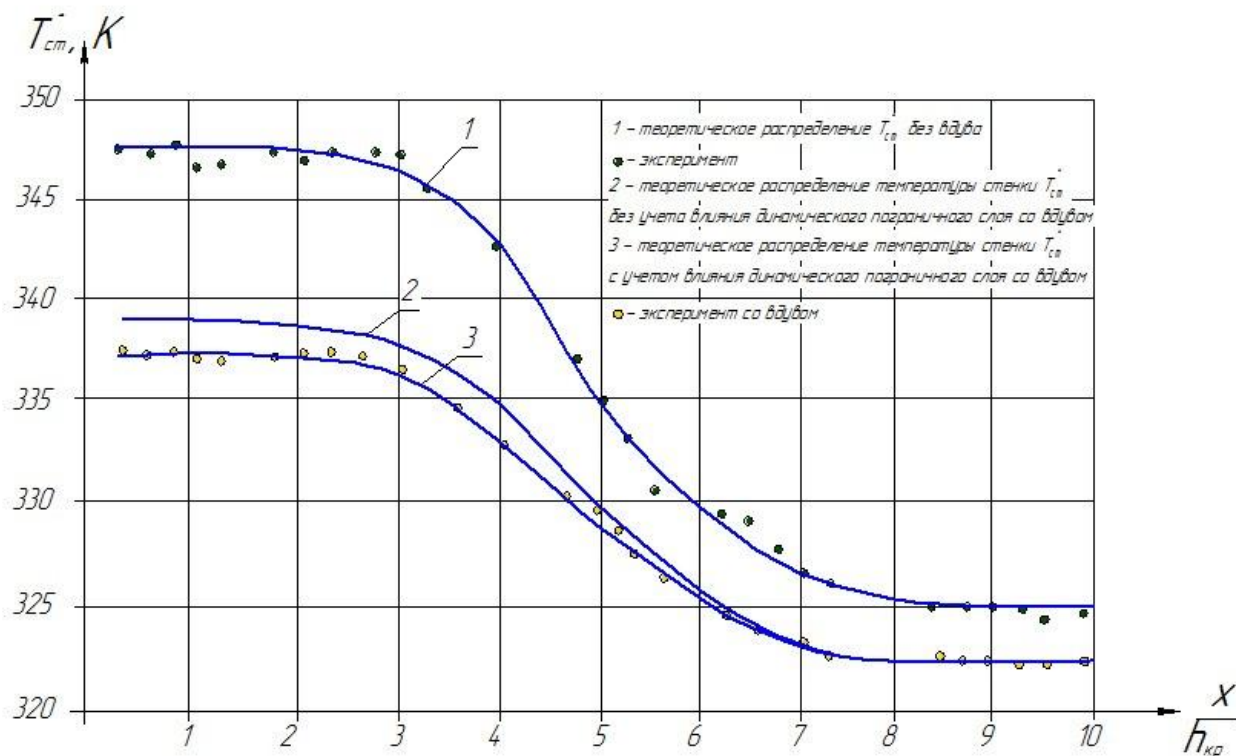


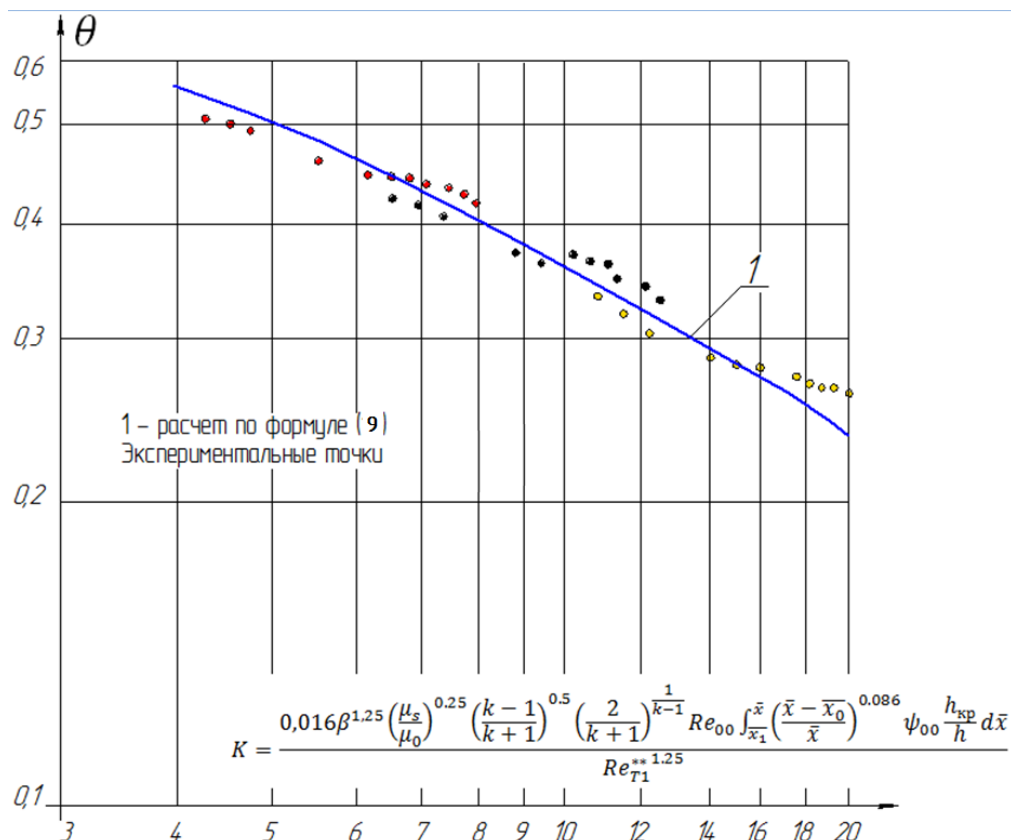
Рис.5 - Влияние динамического пограничного слоя на температуру теплоизолированной стенки

## Выводы

Выполнено экспериментальное исследование влияния параметра вдува на эффективность газовой завесы в сверхзвуковом плоском сопле при щелевом тангенциальном вдуве на расчетном режиме течения газа. Проведены исследования влияния параметра вдува на равновесную температуру теплоизолированной стенки плоского сопла на расчетном режиме. Показано, что с увеличением параметра вдува происходит снижение температуры теплоизолированной стенки плоского сопла на расчетном режиме.

Анализ экспериментальных данных показал, что наличие предвключенного участка теплообмена повышает эффективность газовой завесы на 20...30%, кроме того, эффективность завесы возросла на 15% при увеличении длины предвключенного теплоизолированного участка в два раза.





**Рис.6** – Экспериментальные данные по эффективности газовой завесы в плоском сопле с учетом предключенного теплоизолированного участка

Проведенное сопоставление экспериментальных и расчетных данных свидетельствует об удовлетворительной точности метода расчета газовых завес Кутателадзе-Леонтьева при корректном учете динамической и тепловой предыстории потока.

### Список литературы

1. Алемасов В.Е., Дрегаллин А.Ф., Тишин А.П. Теория ракетных двигателей // М.: Машиностроение, 1980 – 535 с.
2. Барышев Ю.В. Исследование эффективности газовой завесы в сверхзвуковом турбулентном пограничном слое // Автореферат диссертации к.т.н. Институт механики МГУ им. М.В. Ломоносова – 1972г. – 13 с.
3. Волчков Э.П. Пристенные газовые завесы // Новосибирск: Наука, 1983 – 238 с.
4. Волчков Э.П., Козьменко В.К., Лебедев В.П. Экспериментальное исследование эффективности газовой завесы в сверхзвуковом осесимметричном сопле // Изв. СО АН СССР. Серия техн. наук, восп.2. - №88.1977. С. 40-46.
5. Кутателадзе С.С., Леонтьев А.И. Тепловая завеса при турбулентном пограничном слое газа // ТВТ. – 1963. Т.1. №2. С. 281-290
6. Кутателадзе С.С., Леонтьев А.И. Тепломассообмен и трение в турбулентном пограничном слое // М: Энергоатомиздат, 1985. 320 с.

7. Леонтьев А.И., Лущик В.Т., Якубенко А.Е. Особенности теплообмена в области газовой завесы при вдуве инородного газа // Изв. РАН. МЖГ. 2010. №4. С. 51-58
8. Леонтьев А.И., Олимниев В.В. Анализ эффективности пристенных закручивателей потока (обзор) // Теплоэнергетика - 2013. №4. С. 59-68.
9. Лущик В.Г., Якубенко А.Е. Пристенная щелевая завеса на пластине в сверхзвуковом потоке. Сравнение расчета с экспериментом // Изв. РАН. МЖГ. - 2001. №6. С. 83-91.
10. Лущик В.Т., Якубенко А.Е. Пристенная щелевая завеса в сопле. Сравнение расчета с экспериментом // Изв. РАН. МЖГ. 2000. №6. С. 34-45.
11. Себан Р., Бэк Л. Эффективность защиты и теплопередача в турбулентном пограничном слое при тангенциальном вдуве и переменной скорости основного потока // Теплопередача – 1962. Т.84. №3. С. 50-61.
12. Харнет, Экерт, Биркебак Анализ основных характеристик турбулентного пограничного слоя с подачей воздуха через тангенциальные щели // Теплопередача. – 1961. Т83. №3. С. 80-98.
13. Бурцев С.А. Анализ влияния различных факторов на значение коэффициента восстановления температуры на поверхности тел при обтекании потоком воздуха. Обзор // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2004. № 11. DOI: [10.7463/1104.0551021](https://doi.org/10.7463/1104.0551021) .